

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

Dissertação de Mestrado

**Análise das Técnicas da Ventilação Sob
Demanda e do Economizador de Ar Externo em
Sistemas de Condicionamento de Ar**

Autor: **Daniel Oliveira Mochizuki**

Orientador: **Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

Co-orientador: **Prof. Dr. Marcelo José Pirani**

Itajubá, agosto de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

Daniel Oliveira Mochizuki

**Análise das Técnicas da Ventilação Sob
Demanda e do Economizador de Ar Externo em
Sistemas de Condicionamento de Ar**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: **Conversão de Energia**

Orientador: **Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

Co-orientador: **Prof. Dr. Marcelo José Pirani**

Itajubá, agosto de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

Daniel Oliveira Mochizuki

**Análise das Técnicas da Ventilação Sob
Demanda e do Economizador de Ar Externo em
Sistemas de Condicionamento de Ar**

Dissertação aprovada em banca examinadora em 26 de agosto de 2014, conferindo ao autor o título de ***Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.***

Banca Examinadora

Prof. Dr. Flávio Neves Teixeira

Prof. Dr. José Carlos Escobar Palácio

Prof. Dr. Marcelo José Pirani (Co-Orientador)

Prof. Dr. Osvaldo José Venturini (Orientador)

Itajubá, agosto de 2014

Inserir Termo de Aceite

Dedicatória

Ao meu país, Brasil, e todos aqueles que fizeram parte de minha vida no percurso de elaboração deste presente trabalho, pais, professores, colegas, amigos e esposa.

Agradecimentos

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Osvaldo José Venturini, pelas primeiras orientações e disponibilidade quando regressei à Universidade Federal de Itajubá, a fim de iniciar o mestrado, e por ter creditado a mim confiança, bem como pela paciência e por ter lançado desafios.

Ao meu Co-orientador, Prof. Dr. Marcelo José Pirani, pela cooperação e disponibilidade.

Aos amigos e colegas do NEST e da UNIFEI, pelo companheirismo marcante.

Aos Professores da Universidade Federal de Itajubá, pela gama de conhecimentos e sabedoria compartilhada.

Aos funcionários do Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, pela conduta prestativa e anos de convivência.

À CAPES, que através do Programa de Demanda Social, possibilitou a realização do presente trabalho, com auxílio financeiro no início do curso.

E, especialmente, aos meus pais, Abel Yukinori Mochizuki e Maria Odete Oliveira Mochizuki, e minha avó materna, Assumpção Martins Oliveira, pela minha formação humana e cidadã. Também aos meus irmãos, Renato e César, que fizeram parte dessa formação.

Também, especialmente, à minha esposa, Cristina Sales, quem me acompanhou e motivou nos últimos anos de mestrado, incentivando a pesquisa e a finalização da presente dissertação.

Por fim, a todos meus companheiros de trabalho na empresa Tottal Tecnologia Térmica, dos engenheiros aos duteiros, por toda dedicação e superações conjuntas que vivemos no dia a dia de nossas profissões.

E quando às pessoas agradeço, também estou manifestando minha gratidão à Deus, presente em cada um de nós.

“Deus quer, o homem sonha, a obra nasce”

Fernando Pessoa

Resumo

Mochizuki, D. O. (2014). *Análise das Técnicas da Ventilação Sob Demanda e do Economizador de Ar externo em Sistemas de Condicionamento de Ar*. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia). Itajubá-MG, Brasil. Instituto de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Itajubá.

Devido ao elevado impacto da climatização artificial na demanda de energia, novas medidas têm sido desenvolvidas, buscando melhorar a eficiência energética dos sistemas convencionais de ar condicionado e ventilação. Dentre as diversas técnicas pesquisadas, a Ventilação Sob Demanda, baseada na concentração de dióxido de carbono (CO₂-DCV), e o Economizador de Ar Externo (EAE), têm recebido grande destaque. O DCV consiste em modular dinamicamente a vazão de ar externo em função da ocupação do ambiente ou da qualidade do ar interno, possibilitando a economia de energia nos momentos mais quentes do dia e quando as condições de ocupação mudam. Dessa forma, com uma leitura das condições internas, pode-se reduzir a taxa de ar externo fornecido pelo sistema, sem deixar de atender as normas de conforto térmico. Por outro lado, edifícios comerciais utilizam a climatização artificial ao longo de todo o ano, mesmo quando a temperatura externa é baixa, fazendo uso da refrigeração por compressão mecânica de vapor para fornecer as condições de conforto. Nestas situações, o EAE ganha espaço, pois quando as condições externas são suficientemente favoráveis, este pode aumentar a vazão de ar externo para eliminar, ou reduzir significativamente, a necessidade de refrigeração mecânica. Assim, o EAE é habilitado quando o ar externo possui temperatura de bulbo seco menor que o ar interno **ou** quando o ar externo possui entalpia menor que o ar interno. Nos demais momentos do dia, o DCV assume o controle e permite reduzir o consumo quando a temperatura é mais alta. A partir de simulações em EnergyPlus, este trabalho busca avaliar os potenciais de redução no consumo de energia, e analisar a viabilidade econômica de um projeto desenvolvido a partir da aplicação conjunta das técnicas do DCV e do EAE, em uma edificação comercial localizada na cidade de São Paulo. Dessa forma, procura-se minimizar o consumo de energia em sistemas de climatização, e tornar as novas técnicas acadêmicas economicamente atraente para as empresas que os compõem condomínios comerciais, preparando-os para as novas certificações de eficiência energética que entrarão em vigor no Brasil.

Palavras chaves: *Ventilação Sob Demanda. DCV. Economizador de Ar Externo. EAE. Eficiência Energética em Edificações. Economia de Energia. Ar condicionado.*

Abstract

Mochizuki, D. O. (2014). *Análise das Técnicas da Ventilação Sob Demanda e do Economizador de Ar externo em Sistemas de Condicionamento de Ar*. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia). Itajubá-MG, Brasil. Instituto de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Itajubá.

Due to the impacts of artificial cooling on energy demand, many techniques have been developed, seeking to improve the energy efficiency of conventional air conditioning systems and ventilation. Among various academic works, Demand Controlled Ventilation based on carbon dioxide concentration (e.g. CO₂-DCV) and airside economizers (EAE) have received great attention. The DCV technique aims on dynamically adjust the outdoor airflow rate according to the instantaneous indoor occupancy, enabling energy savings on the hottest moments of a day on low occupancy conditions. Therefore, from a readout of the internal conditions, the technique can reduce the amount of outdoor air supplied by the system, while still taking into account the standards of thermal comfort. By contrast, commercial buildings uses artificial air conditioning process throughout the entire year, even when the outside temperature is low, making use of mechanical vapor compression equipment, to provide the comfort conditions. Under these circumstances, the EAE technique can reduce demand when the external conditions are sufficiently favorable, by the increasing of the outdoor airflow rate, in order to eliminate or significantly reduce the need of mechanical cooling. Thus, EAE is enabled when the outdoor air dry bulb temperature **or** outdoor air enthalpy are below the internal air conditions. Moreover, the DCV technique takes control of the outdoor airflow rate and reduces power consumption on the hottest moments of a day. From simulations in EnergyPlus, this work aims at evaluating the potential reduction in energy consumption and analyze the economic feasibility of a project developed from the joint application of the DCV and EAE, on a commercial building in the city of Sao Paulo. Thus, this work seeks to minimize the energy consumption in HVAC systems, and make economically attractive these academic techniques to practical implementation. To prepare the Brazilian commercial building to the new energy efficiency certifications that will come into force in Brazil.

Key words: *Demand Controlled Ventilation. DCV. Air Side Economizer. EAE. Energy Efficiency in Buildings. Energy Saving. Air conditioning.*

Sumário

Dedicatória	v
Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
Sumário	x
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xix
Simbologia	xxi
Abreviaturas	xxii
CAPÍTULO 1	25
1. Introdução	25
1.1 Motivação	28
1.2 Objetivos	31
1.2.1 Objetivos principais	31
1.2.2 Objetivos secundários	31
1.3 Estrutura do Trabalho	32
CAPÍTULO 2	33
2. Revisão Bibliográfica	33
2.1.1 Demanda Energética	33
2.2 Conforto Térmico	39

2.3 Climatização Artificial.....	41
2.3.1 Generalidades.....	41
2.3.2 Carga Térmica	42
2.4 Simulação Termoenergética.....	45
2.5 Ferramentas	46
2.5.1 CLDT/CLF	47
2.5.2 Ecotect	47
2.5.3 DesignBuilder	47
2.5.4 DOE-2	48
2.5.5 BLAST	48
2.5.6 EnergyPlus.....	49
2.5.7 Google SketchUp.....	49
2.5.8 OpenStudio	50
2.5.9 Matlab/Simulink	50
2.5.10 Outras.....	51
2.6 Ventilação sob Demanda (DCV).....	51
2.7 Economizador de Ar Externo (EAE)	55
 CAPÍTULO 3.....	 62
 3. O Uso do EnergyPlus para Simulações Energéticas	 62
3.1 Introdução	62
3.2 Módulos de Simulação	65
3.3 Objetos.....	67
3.4 Arquivo de Entrada de Dados	70
3.5 Arquivos Climáticos	72
3.5.1 Ano Climático de Referência.....	74
3.5.2 Ano Meteorológico Típico	75
3.5.3 Clima Internacional para Cálculo de Energia.....	76
 CAPÍTULO 4.....	 78
 4. Metodologia	 78
4.1 Características da Edificação	80

4.2 Biblioteca de Dados Construtivos	86
4.2.1 Materiais.....	86
4.2.2 Construções	91
4.3 Envoltória.....	93
4.3.1 Zonas Térmicas	93
4.3.2 Janelas e Portas.....	97
4.3.3 Dispositivos de Sombreamento.....	100
4.3.4 Geolocalização	100
4.4 Cargas Internas	101
4.4.1 Pessoas, Iluminação e Equipamentos Elétricos	101
4.4.2 Perfis de Utilização	103
4.4.3 Ventilação e Renovação de Ar	105
4.5 Sistema de Condicionamento de Ar	106
4.6 Modelagem DCV	110
4.7 Casos de Estudo	115
4.8 Fluxograma da Metodologia Desenvolvida	115
CAPÍTULO 5.....	117
5. Análise de Resultados.....	117
5.1 Condições de Conforto com DCV.....	118
5.1.1 Temperatura Interna	118
5.1.2 Umidade Relativa Interna.....	124
5.1.3 Concentração Interna de CO₂.....	128
5.2 Consumo de Energia com DCV	134
5.3 O Economizador de Ar Externo	149
5.3.1 Controle pela Temperatura de Bulbo Seco	150
5.3.2 Controle por Entalpia.....	155
5.4 Economizador de Ar Externo e DCV Combinados	162
5.4.1 Controle Diferencial de Temperatura.....	163
5.4.2 Controle Diferencial de Entalpia	166
5.5 Consumo de Energia com EAE.....	169
5.6 Condições de Conforto com EAE	180

Capítulo 6	190
6. Análise Econômica	190
6.1 Cálculos Econômicos no EnergyPlus	191
6.2 O Sistema de Bandeiras Tarifárias	194
6.3 Cálculos dos Custos de Energia	195
6.3.1 Consumo de Energia.....	199
6.3.2 Demanda de Potência.....	201
6.4 Viabilidade Econômica de Projetos.....	204
6.4.1 Método do Valor Presente Líquido	205
6.4.2 Método da Taxa Interna de Retorno.....	206
6.4.3 Método do Tempo de Recuperação do Investimento.....	206
6.5 Custos dos Controladores DCV e EAE	207
6.6 Análise de Viabilidade.....	208
6.7 Análise de Sensibilidade	210
Capítulo 7	214
7. Conclusões e Sugestões	214
7.1 Conclusões	214
7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	217
Referências Bibliográfica	218

Lista de Figuras

Figura 2.1: Aumento do consumo de energia elétrica com o crescimento do PIB.....	34
Figura 2.2: Consumo por uso final para diferentes tipos de edificações.....	36
Figura 2.3: Melhorias na parte civil de um prédio e conseqüente redução da carga térmica...44	
Figura 2.4: Parâmetros e dados de entrada para simulações termoenergéticas.....	45
Figura 2.5: Linhas de transição entre as áreas de atuação do EAE na carta psicrométrica.....	57
Figura 2.6: Linha ideal de transição para um controlador EAE.....	58
Figura 2.7: Área de erro teórico para a estratégia de controle diferencial da temperatura de bulbo seco, na carta psicrométrica.....	58
Figura 2.8: Área de erro teórico para a estratégia de controle diferencial de entalpia, na carta psicrométrica.....	59
Figura 2.9: Área de erro teórico para a estratégia entalpia eletrônica, na carta psicrométrica.	59
Figura 3.1: Estrutura de processamento de dados no EnergyPlus.....	66
Figura 4.1: Planta do Pavimento Térreo.....	81
Figura 4.2: Planta do Pavimento 1.....	82
Figura 4.3: Layout do Pavimento 1.....	83
Figura 4.4: Planta do Pavimento 2.....	84
Figura 4.5: Vista geral do empreendimento.....	85
Figura 4.6: Vista lateral do empreendimento.....	85
Figura 4.7: Balanço de energia nas faces internas e externas de uma parede.....	88
Figura 4.8: Vista da entrada principal do empreendimento.....	96
Figura 4.9: Vista traseira do empreendimento.....	96
Figura 4.10: Incidência de radiação solar sobre o vidro.....	97
Figura 4.11: Dispositivos de sombreamento e edifícios vizinhos.....	100

Figura 4.12: Variação da ocupação dos ambientes ao longo do dia.....	105
Figura 4.13: Mapa dos nós de sistema do EnergyPlus para o Sistema AC-P1/S1.....	108
Figura 4.14: Variação da ocupação dos ambientes ao longo do dia.....	111
Figura 4.15: Concentração interna de CO ₂ para um ambiente de escritórios.	114
Figura 4.16: Fluxograma da metodologia utilizada para a modelagem e simulação dos casos estudados.	116
Figura 5.1: Temperatura interna para os ambientes do sistema AC-P1/S1.....	120
Figura 5.2: Vazão de ar externo e temperatura externa para o equipamento AC-P1/S1.....	121
Figura 5.3: Temperatura interna para a Convivência, no sistema AC-PT/S2.	122
Figura 5.4: Vazão mássica de ar externo para a Convivência, no sistema AC-PT/S2.....	122
Figura 5.5: Temperatura interna para o Auditório, no sistema AC-P1/S3.....	123
Figura 5.6: Vazão mássica de ar externo para o Auditório, no sistema AC-P1/S3.....	124
Figura 5.7: Umidade relativa interna para as zonas térmicas do sistema AC-P1/S1.....	126
Figura 5.8: Vazão de ar externo e umidade relativa externa para o equipamento AC-P1/S1.....	127
Figura 5.9: Umidade relativa interna para a Convivência, no sistema AC-PT/S2.....	127
Figura 5.10: Umidade relativa interna para o Pav1 – Auditório, no sistema AC-P1/S3.....	128
Figura 5.11: Vazão de ar externo e concentração de CO ₂ externa para o equipamento AC-P1/S1.....	129
Figura 5.12: Concentração de CO ₂ para as zonas térmicas do sistema AC-P1/S1.....	130
Figura 5.13: Concentração de CO ₂ para as zonas térmicas do sistema AC-P1/S2.....	131
Figura 5.14: Concentração de CO ₂ para o Pav1 – Auditório, no sistema AC-P1/S3.....	132
Figura 5.15: Concentração interna de CO ₂ e ocupação instantânea no Convivência.....	133
Figura 5.16: Concentração interna de CO ₂ e ocupação instantânea no Auditório.	134
Figura 5.17: Entalpia do ar externo e entalpia do retorno do AC-P1/S2.....	135
Figura 5.18: Temperatura de bulbo seco e umidade relativa para o ambiente externo.	135
Figura 5.19: Consumo anual total de energia elétrica por fonte.....	136
Figura 5.20: Consumo anual total de energia elétrica com condicionamento de ar.....	136

Figura 5.21: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S1, no dia 08 de Janeiro.....	138
Figura 5.22: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S2, no dia 08 de Janeiro.....	138
Figura 5.23: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S3, no dia 08 de Janeiro.....	139
Figura 5.24: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S1, no dia 07 de Janeiro.....	140
Figura 5.25: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S2, no dia 07 de Janeiro.....	140
Figura 5.26: Carga térmica total para Sistema AC-P1/S3, no dia 07 de Janeiro.....	140
Figura 5.27: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S1, no dia 19 de Julho.....	141
Figura 5.28: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S2, no dia 19 de Julho.....	141
Figura 5.29: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S3, no dia 19 de Julho.....	142
Figura 5.30: Influência das estratégias de controle do ar externo sobre a carga térmica total na condição de inverno para o Sistema AC-P1/S1.....	143
Figura 5.31: Influência das estratégias de controle do ar externo sobre a carga térmica total na condição de inverno para o Sistema AC-P1/S2.....	145
Figura 5.32: Influência das estratégias de controle do ar externo sobre a carga térmica total na condição de inverno para o Sistema AC-P1/S3.....	146
Figura 5.33: Consumo mensal de energia elétrica nos compressores para o Pavimento 1. ...	147
Figura 5.34: Inversão de carga térmica para as temperaturas interna e externa no Verão.	151
Figura 5.35: Inversão de carga térmica para as temperaturas interna e externa no Inverno. .	153
Figura 5.36: Inversão de carga térmica para as temperaturas interna e externa na Meia Estação.....	154
Figura 5.37: Inversão de carga térmica para as entalpias interna e externa no sistema AC-P1/S2 e condições ambientais em 02 de janeiro.	156
Figura 5.38: Inversão de carga térmica para as entalpias interna e externa no sistema AC-P1/S2 e condições ambientais em 03 de janeiro.	157
Figura 5.39: Inversão de carga térmica para as entalpias interna e externa no sistema AC-P1/S2 e condições ambientais em 08 de janeiro.	158
Figura 5.40: Inversão de carga térmica para as entalpias interna e externa no sistema AC-PT/S2 e condições ambientais em 08 de janeiro.	159

Figura 5.41: Inversão de carga térmica para as entalpias interna e externa no sistema AC-PT/S2 e condições ambientais em 10 de julho.	161
Figura 5.42: Variação da vazão de ar externo e temperatura interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de temperatura, no AC-PT/S2 - Modelo M1.	164
Figura 5.43: Variação da vazão de ar externo e temperatura interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de temperatura, no AC-PT/S2 - Modelo M4.	165
Figura 5.44: Variação da vazão de ar externo e temperatura interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de temperatura, no AC-P1/S2 - Modelo M1.	165
Figura 5.45: Variação da vazão de ar externo e temperatura interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de temperatura, no AC-P1/S2 - Modelo M4.	166
Figura 5.46: Variação da vazão de ar externo e entalpia interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de entalpia, no AC-PT/S2 - Modelo M1.	167
Figura 5.47: Variação da vazão de ar externo e entalpia interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de entalpia, no AC-PT/S2 - Modelo M4.	167
Figura 5.48: Variação da vazão de ar externo e entalpia interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de entalpia, no AC-P1/S2 - Modelo M1.	168
Figura 5.49: Variação da vazão de ar externo e entalpia interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de entalpia, no AC-P1/S2 - Modelo M4.	168
Figura 5.50: Carga térmica e vazão de ar externo pela ação combinada do DCV e EAE no AC-PT/S2.	171
Figura 5.51: Carga térmica e vazão de ar externo pela ação combinada do DCV e EAE no AC-P1/S2.	174
Figura 5.52: Consumo de energia nos compressores do AC-P1/S2, nos cenários considerados.	177
Figura 5.53: Consumo anual de energia elétrica com condicionamento de ar.	178
Figura 5.54: Consumo anual de energia elétrica nas unidades condensadoras.	179

Figura 5.55: Consumo anual de energia elétrica com condicionamento de ar.....	179
Figura 5.56: Consumo anual de energia elétrica total do edifício.....	179
Figura 5.57: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Engenharia, sistema AC-P1/S2 - Modelo M1, em 08 de janeiro.....	181
Figura 5.58: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Convivência, sistema AC-PT/S2 - Modelo M1, em 08 de janeiro.....	183
Figura 5.59: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Engenharia, sistema AC-P1/S2 - Modelo M1, em 02 de janeiro.....	184
Figura 5.60: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Convivência, sistema AC-PT/S2 - Modelo M1, em 02 de janeiro.....	185
Figura 5.61: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Convivência, sistema AC-PT/S2 - Modelo M4, em 08 de janeiro.....	187
Figura 5.62: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Convivência, sistema AC-PT/S2 - Modelo M4, em 02 de janeiro.....	188
Figura 6.1: Exemplo de fluxo de caixa para uma alternativa de investimento.....	204
Figura 6.2: Análise de sensibilidade com relação à Tarifa de Eletricidade (caso M4-C2). ...	212
Figura 6.3: Análise de sensibilidade com relação ao Custo de Equipamento (caso M4-C2).	212
Figura 6.4: Análise de sensibilidade com relação ao Custo à TMA.....	213

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Intensidade média de consumo por tipo de edificação.	37
Tabela 3.1: Exemplo de entrada de dados para o Objeto <i>Building</i>	68
Tabela 3.2: Exemplo de entrada para o Objeto <i>BuildingSurface:Detailed</i>	69
Tabela 3.3: Exemplo de entrada direta de dados para o Objeto <i>Building</i>	69
Tabela 3.4: Arquivo de entrada de dados gerado pelo IDF Editor.	71
Tabela 4.1: Ocupação máxima e cargas internas para o Pavimento Térreo.	81
Tabela 4.2: Ocupação máxima e cargas internas para o Pavimento 1.....	82
Tabela 4.3: Ocupação máxima e cargas internas para o Pavimento 2.....	83
Tabela 4.4: Ocupação máxima e cargas internas para o Pavimento 3.....	84
Tabela 4.5: Dados de entrada do objeto <i>Material</i> para diversos materiais.....	89
Tabela 4.6: Dados de entrada de materiais para objetos de outras Classes.	90
Tabela 4.7: Exemplos de definição para os objetos da Classe <i>Construction</i>	92
Tabela 4.8: Dados de entrada para uma folha de vidro simples com 3mm de espessura.....	98
Tabela 4.9: Geração interna de calor devido às pessoas.....	101
Tabela 4.10: Geração interna de calor devido à iluminação.	102
Tabela 4.11: Geração interna de calor devido aos equipamentos elétricos.	103
Tabela 4.12: Dados de entrada para feriados e horário de verão.....	103
Tabela 4.13: Agenda de ocupação para a Convivência.	104
Tabela 4.14: Agenda de ocupação para os escritórios.....	104
Tabela 4.15: Especificação da vazão de ar externo de projeto.	106
Tabela 4.16: Condicionadores Autônomos Compactos, ambientes atendidos e capacidades.....	109
Tabela 4.17: Casos de estudo.	115

Tabela 5.1: Casos de estudo.	117
Tabela 5.2: Condicionadores Autônomos Compactos, ambientes atendidos e capacidades..	118
Tabela 5.3: Cenários de aplicação do EAE, combinado com o DCV.	162
Tabela 5.4: Vazões de ar externo máximas e mínimas para os novos Cenários.	163
Tabela 5.5: Consumo anual e economia percentual com relação ao Modelo M1.	180
Tabela 6.1: Exemplo dos objetos utilizados para cálculos de tarifas.	193
Tabela 6.2: Custos de Geração e Bandeira Tarifária virtualmente em vigor para o ano de 2013.	196
Tabela 6.3: Custos de Geração e Bandeira Tarifária virtualmente em vigor para o ano de 2013.	197
Tabela 6.4: Custo anual com energia elétrica para o Modelo M1 no Cenário C0.	198
Tabela 6.5: Consumo anual total obtido pelos medidores <i>Electricity:Facility</i> e <i>Electricity:HVAC</i>	200
Tabela 6.6: Custo anual faturado pelo consumo.	200
Tabela 6.7: Redução percentual dos custos de energia faturados com base no consumo.	201
Tabela 6.8: Demanda anual obtida pelos medidores <i>Electricity:Facility</i> e <i>Electricity:HVAC</i>	202
Tabela 6.9: Custo anual faturado pela Demanda.	202
Tabela 6.10: Redução percentual dos custos de energia faturados com base na demanda. ...	203
Tabela 6.11: Custos dos equipamentos e controladores para DCV e EAE.	207
Tabela 6.12: Custos totais e incrementais para cada caso.	207
Tabela 6.13: Indicadores financeiros para o Cenário C2 na atual estrutura tarifária.	208
Tabela 6.14: Indicadores financeiros para o Cenário C2 na nova estrutura tarifária.	210
Tabela 6.15: Análise de sensibilidade para o Modelo M4.	211

Simbologia

α – Absortância

A – Absorção pelo vidro

b – Sobrescrito, Traseira

C_t – capacidade térmica

C_e – Custo Evitado Anual

f – Sobrescrito, Frontal

Δh – Diferença de Entalpia

I – Investimento Inicial

n – Tempo de Vida do Projeto

$Payback_s$ – Payback Simples, Tempo de retorno do Investimento

\dot{Q}_{AE} – Carga Térmica do Ar Externo

ρ – Reflectância

ρ_{AE} – Massa Específica do Ar Externo

R – Reflexão pelo vidro

R_t – resistência térmica

τ – Transmitância

T – Transmissão pelo vidro

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

U – Fator Global de Transmissão de Calor

\dot{V}_{AE} – Vazão Volumétrica de Ar Externo

VPL – Valor Presente Líquido

Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AE – Ar Externo

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ASCII – American Standard Code for Information Interchange – Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação, é um código binário para codificação de texto.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – Sociedade Americana dos Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado

BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics – Programa de Análise de Cargas e Sistemas Termodinâmicos de Edifícios

BEN – Balanço Energético Nacional

CAD – Computer Aided Design – Projeto Auxiliado por Computador

CLP – Controlador Lógico Programável

CLTD / CFL – Cooling Load Temperature Differential / Cooling Load Factors – Temperatura Diferencial de Carga de Resfriamento / Fatores de Carga de Resfriamento

CT – Carga Térmica

CONPET – Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural

COP – Coeficiente de Performance

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CSV – Comma Separated Value – Arquivo de Valores Separados por Vírgula

CTF – Conduction Transfer Function – Funções de Transferência de Calor por Condução

DCV – Demand Controlled Ventilation - Ventilação Sob Demanda

DOE-2 – Programa de Simulação do Departamento de Energia dos Estados Unidos versão 2

EAE – Economizador de Ar Externo

EIA – Energy Information Administration – Administração de Informações de Energia dos Estados Unidos

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPW – EnergyPlus Weather File – Arquivo Climático do EnergyPlus

ESP-r – Programa de Simulação Integrada de Edifícios

HAP – Hourly Analysis Program – Programa de Análise Horária de Carga Térmica da Carrier

HVAC – Heating, Ventilation and Air Conditioning – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

IAQP – Indoor Air Quality Procedure – Método da Qualidade do Ar Interior

ICE – Indoor Climate and Energy – Programa de Simulação de Climatização e Energia

IDF – Input Data File – Arquivo de Dados de Entrada do EnergyPlus

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change – Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas

ISO – International Organization for Standardization – Organização Internacional Normatização

IWEC – International Weather for Energy Calculations – Clima Internacional para Cálculo de Energia

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética de Edificações

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration – Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos

NREL – National Renewable Energy Laboratory – Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU – Organização das Nações Unidas

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

PIB – Produto Interno Bruto

PNEf – Plano Nacional de Eficiência Energética

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

SIN – Sistema Interligado Nacional

SRD – Serpentina de Resfriamento e Desumidificação

SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment – Avaliação de Recursos Energéticos Solares e Eólicos da ONU

TBS – Temperatura de Bulbo Seco

TBU – Temperatura de Bulbo Úmido

TIR- Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

TMY – Typical Meteorological Year – Ano Meteorológico típico

TR – Tonelada de Refrigeração

TRACE – Programa de Simulação de Edifícios da Trane

TRNSYS – Transient Systems Simulation Software – Programa de Simulação de Sistemas Transientes

TRY – Tested Reference Year – Ano Climático de Referência

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UNEP – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

UR – Umidade Relativa

US-DOE – Departamento de Energia dos Estados Unidos

VAV – Volume de Ar Variável

VPL – Valor Presente Líquido

VRP – Ventilation Rate Procedure – Método da Taxa de Ventilação

VRV – Volume de Refrigerante Variável

WYEC – Weather Years for Energy Calculations – Anos Climáticos para Cálculos de Energia

CAPÍTULO 1

1. Introdução

Devido a fatores como desenvolvimento econômico, aumento da produção industrial e crescimento populacional, a demanda energética vem aumentando consideravelmente no mundo todo. Desse total, grande parte é consumida nos processos de refrigeração por compressão mecânica de vapor para conforto.

Dessa forma, com a crescente preocupação com a racionalização do uso da energia elétrica nesses sistemas, muitos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de elevar a eficiência energética de edificações, principalmente quanto aos sistemas de condicionamento de ar e de iluminação.

Segundo Trčka et al. (2010), é fato conhecido que nos países desenvolvidos, os edifícios são responsáveis por 30% a 40% da energia consumida. Dependendo do tipo de construção, os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado são responsáveis por 10% a 60% do total do consumo de energia nesses edifícios. Por esta razão, e considerando o longo ciclo de vida de empreendimentos como estes, se evidencia ainda mais a importância de soluções energeticamente responsáveis para projetos arquitetônicos e de engenharia.

Dentre as diversas propostas existentes, estão técnicas para avaliação do desempenho térmico de edificações por meio de modelagem e simulação computacional, comparação de elementos construtivos quanto às suas propriedades termodinâmicas, estratégias para redução das cargas internas de iluminação, técnicas de controle de ventilação, redução do calor dissipado no ambiente por meio de equipamentos elétricos mais eficientes, dentre outras.

Ainda, os sistemas de ar condicionado comumente instalados no Brasil, raramente consideram métodos mais avançados de economia de energia e redução de demanda. Geralmente os sistemas mais baratos e de fácil instalação e comissionamento são adotados, não só pela questão financeira, mas também pela escassez de serviços especializados de eficiência energética.

De forma geral, o Brasil possui uma legislação bastante completa quanto à eficiência energética. Segundo PNEf (2012), há pelo menos duas décadas existem no país programas reconhecidos internacionalmente com esse propósito, como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL (Eletrobrás, 2014), o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural – CONPET (CONPET, 2014), e o Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE (Inmetro, 2014). Cada um deles têm sido ampliados e aplicados com êxito nos últimos anos.

Em 2001, somente após a grave crise energética que assolou o país, o Governo Federal e o Congresso Nacional instituíram a Lei nº 10.295, de 17 de Outubro de 2001 (Brasil, 2001), também chamada de Lei da Eficiência Energética, sendo considerada o marco regulatório da matéria no Brasil. A Lei nº 10.295/2001 criou e regulamentou os instrumentos legais que possibilitaram ao Procel a implementação da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem.

Através do Procel, a ENCE fornece ao consumidor uma classificação dos produtos com relação a um nível máximo de consumo ou mínimo de eficiência. Inicialmente, a ENCE foi aplicada apenas a eletrodomésticos, passando posteriormente a equipamentos industriais, como motores de indução trifásicos, etc. Hoje, a ENCE também é utilizada na classificação de veículos automotores, edificações, e residências.

Já o CONPET (2014) coordena tecnicamente a regulamentação da Lei 10.295/2001 para os aparelhos que consomem derivados do petróleo ou gás natural. E o selo CONPET visa destacar para o consumidor, aqueles modelos que atingem os graus máximos de eficiência energética na ENCE. Concedido anualmente pela Petrobrás, o Selo é um estímulo à fabricação de modelos cada vez mais eficientes no consumo de combustíveis.

Quanto às edificações, dentro do programa Procel-Edifica, a ENCE avalia o desempenho energético da Envoltória, da Iluminação e dos Sistemas de Ar-Condicionado através de um sistema de pontuação individual de cada sistema, que gera a nota global do empreendimento em avaliação. As notas, assim como nos eletrodomésticos, vão de “A” para mais eficiente até “E” para menos eficiente. E inicialmente, a ENCE é emitida de forma provisória para o projeto do edifício e, de forma definitiva para a edificação finalizada. A ENCE ainda pode ser aplicada a qualquer edificação existente.

Certamente, a ENCE é um instrumento de grande valia na busca pela melhoria da eficiência energética no Brasil, e uma parcela considerável da população já leva em conta a

classificação energética do produto na hora da compra. Porém, apenas para um pequeno grupo de produtos, a etiquetagem pela ENCE é compulsória e na grande maioria dos casos o fabricante fica livre para escolher se submete seu produto à avaliação ou não.

Quanto à ENCE do Procel-Edifica, a classificação também é voluntária e deve se tornar obrigatória em todas as edificações até 2030, segundo o PNEf (2012). O Governo Federal exige a ENCE em caráter obrigatório apenas para as licitações de novos edifícios públicos. Portanto, com exceção dos grandes empreendimentos que implementam as novas técnicas de eficiência energética e, conseqüentemente a ENCE, em troca de benefícios comerciais, ainda não existe nenhum indício de aplicação em massa dessas técnicas no Brasil. Deve-se lembrar que os programas mencionados aqui não têm caráter normativo.

Conforme será visto no Capítulo 2, na Academia existem diversas técnicas sendo desenvolvidas e estudadas há anos, como a Ventilação Sob Demanda (DCV), os economizadores de Ar e Água, etc. Ainda, resfriadores evaporativos, sistemas de refrigeração por absorção e adsorção, desumidificadores dessecativos e diversas outras técnicas de resfriamento passivo ou tecnologias alternativas à compressão mecânica de vapor, vem sendo estudadas.

Essas técnicas, no entanto, têm muito pouco espaço no Brasil devido à legislação, conservadora com relação a outros países. Dessa forma, com a falta de uma norma efetiva de sustentabilidade energética, não existe nada que obrigue, ou incentive veementemente, empresários e engenheiros a adotarem as novas técnicas de redução de demanda em sistemas de condicionamento de ar, para edifícios comerciais.

A falta de interesse, então, cria uma lacuna no mercado e antes que a aplicação das técnicas de eficiência energética em edificações torne-se obrigatória, existe a necessidade de se criar um potencial de fornecimento de serviços desse tipo, preparando o mercado para uma grande demanda futura.

Isso pode ser obtido com pesquisa e desenvolvimentos de novas técnicas, bem como com a adaptação para a realidade brasileira, de medidas já aplicadas com êxito em países onde a eficiência energética é uma realidade há anos. Nesse sentido, um diálogo mais efetivo entre o mercado de sistemas HVAC e a Academia torna-se estritamente necessário, aproximando a teoria à prática.

1.1 Motivação

Segundo Seem e House (2010), os edifícios comerciais geralmente necessitam de condicionamento de ar durante todo o ano, porque os ganhos de calor internos podem exceder perdas pela envoltória, mesmo quando as condições exteriores são bastante frias. Dessa forma, os equipamentos de compressão mecânica de vapor são comumente usados para fornecer conforto mesmo no inverno.

Conforme foi dito anteriormente, os sistemas de ar condicionado largamente utilizados no Brasil não possuem qualquer dispositivo de controle de suas funções, operando em condições estáticas de projeto e controle de capacidade do tipo liga-desliga. Geralmente, são dimensionados para uma condição máxima de ganhos de calor pela estrutura, intensidade de ocupação e uso de equipamentos, com a taxa de ventilação de ar externo sendo dimensionada para essa condição chave, definida pelo projetista.

Após a obra de instalação, deve-se garantir que todos os equipamentos irão operar de modo a atender as condições especificadas no projeto, na etapa de comissionamento dos sistemas. Conforme Bendiksen e Young (2005) e Horsley (1998), o comissionamento é um conjunto de técnicas de engenharia, específicas para cada tipo de instalação, que são executadas de modo a assegurar que os sistemas e componentes de uma edificação ou unidade industrial estejam projetados, instalados, testados, operados e mantidos de acordo com as necessidades e requisitos operacionais do proprietário.

Porém, mesmo que corretamente projetados, instalados e comissionados, os sistemas de condicionamento de ar são fortemente dependentes das condições climáticas locais, e seu desempenho energético pode mudar muito ao longo do ano. Ou seja, o equipamento condicionador de ar e a instalação irão operar fora das condições de projeto na maioria de sua vida. Nesse contexto, conforme recomenda ASHRAE (2009), no capítulo 35, dedicado à Sustentabilidade, o projeto deve ser feito para uma eficiente e eficaz operação fora do pico de carga térmica, onde a maioria das horas de funcionamento e conseqüente uso de energia ocorre normalmente. Porém, não é o que ocorre no Brasil, onde normalmente projeto e comissionamento são feitos sem qualquer preocupação com o consumo eficiente de energia, em grande parte das instalações.

Dessa forma, o que se encontra na prática são instalações com considerável potencial de redução de consumo, de grande valia para o futuro energético brasileiro. Por exemplo, o simples fato de um equipamento de ar-condicionado operar com vazão constante de ar externo, oculta potenciais de redução de energia nos momentos onde a ocupação do ambiente diminui, e as necessidades de renovação de ar são menores.

Neste momento, se as condições externas forem severas, uma menor taxa de ar externo irá introduzir menos calor e umidade no ambiente interno, reduzindo a carga térmica no equipamento. Para este objetivo, pode-se aplicar a técnica da Ventilação Sob Demanda, que modula a vazão de ar externo de acordo com as necessidades instantâneas de ventilação, como a ocupação dos ambientes, por exemplo.

Por outro lado, com condições externas mais amenas, uma maior vazão de ar externo pode ajudar a remover a carga térmica interna, sem uso da compressão mecânica de vapor, e consequentemente, com menor consumo energético. Nessas condições, conforme Seem e House (2010), um economizador de ar ou de água pode ser usado para fornecer o arrefecimento “gratuito” que pode reduzir ou eliminar a necessidade de refrigeração mecânica.

Ainda, com a grande evolução dos computadores nos últimos anos, as simulações computacionais podem ajudar a evidenciar estes potenciais de redução do consumo de energia. Com o EnergyPlus por exemplo, algoritmo considerado o estado da arte das ferramentas de simulação computacional de edificações, pode-se obter resultados energéticos altamente detalhados a partir dos modelos da estrutura física, da geração interna de calor, dos sistemas de condicionamento de ar e do clima.

Porém, por mais efetivo que sejam os estudos de readequação energética, levem em conta as mais recentes técnicas acadêmicas, e alcancem bons resultados, a aplicação prática sempre acaba esbarrando na questão econômica. E, mesmo que o tempo de retorno do investimento seja aceitável, os altos custos envolvidos em projetos desse tipo desencorajam os empresários a investir em reformas de eficiência energética.

Assim, devido a todos estes fatores, esse trabalho se propõe a elaborar um estudo energético detalhado em uma edificação comercial, definida a partir de boas práticas de projeto, através de sua simulação energética em EnergyPlus. Serão avaliados ainda os impactos das taxas de renovação de ar externo e da aplicação das técnicas da Ventilação Sob Demanda (DCV) e do Economizador de ar externo (EAE).

Por definição, o DCV e o EAE atuam na ventilação de ar externo de forma totalmente oposta uma à outra. Enquanto o DCV reduz a taxa de ar externo para economizar energia nos momentos quentes, o EAE à aumenta para promover o resfriamento gratuito nos momentos frios. Com um sistema apropriado de controle, é possível fazer com que as duas técnicas trabalhem em conjunto para otimizar o consumo de energia, em função das condições climáticas.

A localidade escolhida para a edificação é a cidade de São Paulo, cujo clima possui características bastante variadas, alternando entre dias quentes e secos com dias frios e chuvosos no verão; e dias frios e secos com chuvas ocasionais no inverno. Com essa variedade climática, pode-se também avaliar os impactos das técnicas em estudo nas condições internas dos ambientes.

Dessa forma, portanto, pode-se caracterizar o consumo anual de energia elétrica para todas as situações propostas, levantar os custos dos equipamentos e dos dispositivos de controle, e efetuar um estudo de viabilidade financeira para cada proposta analisada.

Como base de comparação para este estudo, será definido um tipo de instalação comum no Brasil, de forma que as opções propostas possam ser incluídas nos equipamentos. Assim, os estudos financeiros serão feitos relação aos custos adicionais dos dispositivos de controle especificados para implementação das situações propostas. E os benefícios financeiros proporcionados por cada proposta serão mensurados com base em seus potenciais de economia de energia. Portanto, a análise apresentada poderá ser interpretada tanto no caso de uma nova instalação, como no caso de um *retrofit*, ou seja, uma readequação energética de edificação existente.

No âmbito de projetos de eficiência energética em sistemas de condicionamento de ar, os estudos financeiros são interessantes por evidenciar aos proprietários e empresários, que um aumento de custo na instalação pode significar uma redução de despesa ao longo de toda a vida útil do projeto, diminuindo a distância entre mercado e academia.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos principais

- Elaborar um estudo de viabilidade técnica e econômica para a operação conjunta da Ventilação Sob Demanda com o Economizador de Ar Externo.

1.2.2 Objetivos secundários

- Analisar os impactos das técnicas propostas no consumo de energia e nas condições de conforto;
- Analisar os impactos das variações das condições climáticas ao longo do ano, nos parâmetros de operação dos equipamentos;
- Detalhar os potenciais de economia de energia para as diversas condições climáticas ao longo do ano;
- Verificar as diferenças de comportamento das técnicas de ventilação estudadas, em condições diferentes de ocupação e uso dos ambientes, como por exemplo, escritórios, auditórios e grandes salões;
- Quantificar o potencial de economia para a localidade em questão;
- Levantar os indicadores financeiros para a aplicação prática das técnicas do DCV e do EAE;
- Elaborar uma Análise de Sensibilidade sobre os resultados.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho se inicia com a descrição do panorama energético brasileiro e a apresentação das medidas adotadas pelo Governo Federal ao longo dos anos para combater o desperdício e reduzir a demanda por energia elétrica, na introdução do Capítulo 1. Ainda, os objetivos do trabalho são listados e uma breve apresentação do trabalho e da estrutura desta dissertação é feita.

No Capítulo 2, uma revisão da bibliografia sobre os assuntos relacionados é feita, com a apresentação de todos os conceitos, ferramentas e métodos utilizados nesse trabalho. Assim, vários estudos são citados como exemplo desses conceitos, constituindo a base de conhecimento a ser aplicada no caso específico estudado aqui.

O Capítulo 3 apresenta o EnergyPlus e suas funcionalidades, mostrando como seus diversos módulos e algoritmos se combinam para resolver os problemas físicos de transferência de calor e massa, ganhos internos de energia, ventilação, iluminação e ar condicionado; e simular o edifício em todos seus detalhes.

O Capítulo 4 apresenta as metodologias utilizadas na definição do caso de estudo, e os detalhes de modelagem de cada aspecto do edifício através dos objetos do EnergyPlus. Também são mostradas as suas características físicas, que definirão as propriedades termodinâmicas da envoltória, as características energéticas, que definirão as densidades de potência elétrica para os sistemas internos de iluminação, equipamentos e ar condicionado, e as características humanas, que definirão os perfis de ocupação. Dessa forma, toda a situação do caso base é caracterizada, assim como as premissas das técnicas de Ventilação Sob Demanda propostas.

Com base nos modelos definidos no Capítulo 4, é feita no Capítulo 5 a análise dos resultados obtidos nas simulações. Neste capítulo também são definidos os Cenários para a aplicação complementar do Economizador de Ar Externo, de modo a melhorar as condições de redução de consumo da Ventilação Sob Demanda.

No Capítulo 6 são feitas as análises econômicas, com base nos resultados de economia de energia obtidos no Capítulo 5.

Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões dos estudos realizados neste trabalho, bem como deixa sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. Revisão Bibliográfica

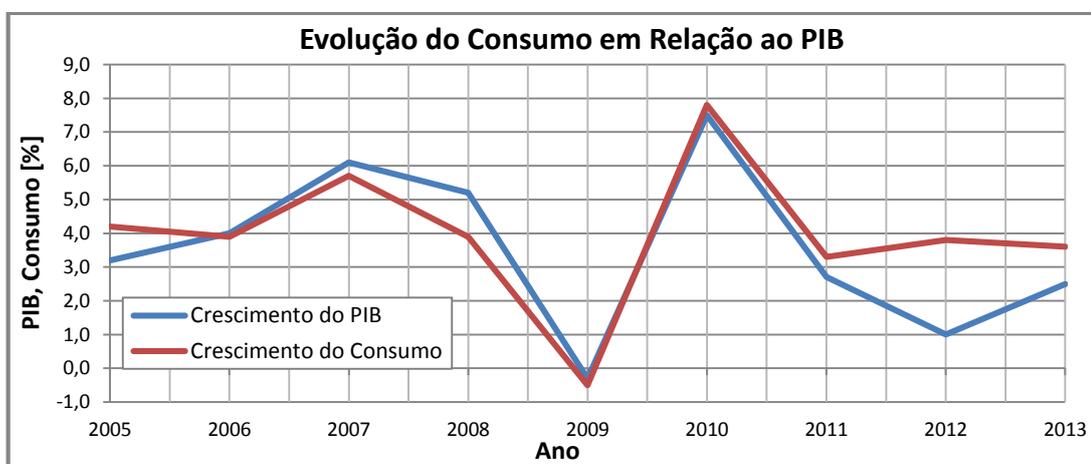
2.1.1 Demanda Energética

Segundo o Balanço Energético Nacional – BEN (2013), o consumo de energia elétrica no Brasil cresceu 3,8% ao longo de 2012, sendo que no setor industrial o crescimento foi de 0,3%, e no setor residencial 2,1%. Os demais setores (comercial, agropecuário, público e transportes), em conjunto, tiveram crescimento de 6,9%. No mesmo período, a geração interna de energia elétrica teve um incremento de 3,9%, e a geração hidráulica, devido à maior participação das térmicas no ano de 2012, teve redução de 2,6%. Com a geração interna somada às importações, a oferta interna de energia elétrica em 2012 foi 4,4% maior que em 2011.

Com relação aos anos anteriores, o BEN (2013) mostrou uma desaceleração no aumento do consumo em praticamente todos os setores, assim como a geração e a oferta interna também cresceram menos. Por exemplo, segundo o BEN (2011), de 2009 para 2010 o consumo total de energia elétrica cresceu 7,8%, com incrementos de 9,9% no setor industrial, de 6,6% no setor residencial e de 4,4% nos demais setores (comercial, agropecuário, público e transportes). No mesmo período, a geração interna de energia elétrica teve um incremento de 10%. Em 2010, as políticas de inclusão social, aumento da renda per capita, produção industrial e o alto crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) de 7,5 %, impulsionaram o consumo geral de energia.

Quanto ao ano de 2011, o consumo foi mais próximo ao de 2012, conforme mostra o BEN (2012). O maior custo de energia devido à maior participação da geração termelétrica na matriz energética brasileira e o fraco crescimento da economia contribuíram para a desaceleração do consumo. Porém, ao longo destes anos, o aumento do consumo sempre foi maior que o crescimento do PIB.

Em 2010 o PIB cresceu 7,5% e o consumo de energia cresceu 7,8%, em 2011 o crescimento do PIB foi de 2,7% contra 3,3% de aumento no consumo. Em 2012, o PIB cresceu 1,0% ante 3,8% de aumento no consumo de energia elétrica. Finalmente, para 2013, o PIB cresceu 2,5% e o consumo de energia avançou 3,6%, segundo resultados do BEN (2014). Os dados de crescimento do PIB são apresentados por IBGE (2014). Assim, o aumento do consumo de energia elétrica sempre acompanha o ritmo de crescimento da economia, medido pela expansão do PIB, conforme mostra a Figura 2.1. Portanto, devido ao crescimento econômico do país nos últimos anos, o consumo de energia elétrica vem aumentando consideravelmente e tende a crescer ainda mais.



Fonte: compilado de BEN (2014) e IBGE (2014)

Figura 2.1: Aumento do consumo de energia elétrica com o crescimento do PIB.

Segundo Gales et al. (2007), historicamente, os países hoje desenvolvidos, ao atingirem determinado nível de desenvolvimento econômico, foram obrigados a reestruturar seu sistema energético. Esta reestruturação foi necessária para manter o crescimento sustentável por muitos anos e sempre foi acompanhada de aumento na demanda de energia primária e no consumo de energia per capita. Segundo os autores, evidências indicam que os países em desenvolvimento tendem a seguir o mesmo caminho. Salientam ainda que, no Brasil, apesar da industrialização mais recente e melhores condições tecnológicas para promover esta reestruturação, caso não sejam feitos investimentos em geração de energia, o atual crescimento econômico não se sustentará.

Conforme Ghisi et al. (2007), entre 1987 e 2000 o aumento do consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro foi em média de 6% ao ano. Dessa forma, esse aumento de consumo de energia tornou de extrema necessidade a implantação ações de eficiência energética no país. Segundo a autora, as políticas de economia de energia são importantes, pois

reduzem as necessidades de investimento em geração de energia elétrica, diminuem o desperdício e melhoram a eficiência da matriz energética brasileira. Assim, além de diminuir a sobrecarga do sistema na ponta e reduzir a importação de energia elétrica, permitem maiores investimentos em novas tecnologias, como a biomassa, por exemplo, que ainda necessitam de maiores períodos de desenvolvimento e projeto para se tornarem plenamente operacionais.

Segundo Geller et al. (2004), no período de 1975 a 2001 o Brasil apresentou um aumento de 250% no consumo de energia, enquanto o consumo per capita aumentou 60%, principalmente devido ao grande crescimento industrial, urbanização e ao aumento do nível de uso de energia nos setores comercial e residencial. Nesse contexto, analisaram as tendências de crescimento no consumo de energia e os objetivos da política energética no Brasil. Propuseram assim, 12 opções de medidas para promover a eficiência energética e as analisaram como um grupo em relação aos seus impactos sobre a oferta total de energia e a demanda, bem como sobre as emissões relativas de CO₂. As medidas sugeridas pelos autores foram:

- Adotar padrões mínimos de eficiência para eletrodomésticos, motores e produtos de iluminação;
- Expandir os investimentos em serviços públicos com foco na eficiência energética;
- Adotar códigos de energia para os novos edifícios comerciais
- Expandir o uso de sistemas de cogeração a gás natural
- Adotar padrões mínimos de eficiência para novas usinas de energia térmica
- Adotar metas de redução de intensidade energética industrial
- Adotar padrões rígidos para economia de combustível ou normas para emissões mínimas de CO₂, nos novos veículos de passageiros;
- Expandir a produção e uso do etanol combustível;
- Estimular sistemas de cogeração a partir do bagaço e outros produtos de cana;
- Estimular a energia eólica conectada à rede elétrica;
- Estimular o uso de energia renovável em aplicações isoladas da rede;
- Melhorar a eficiência do transporte de mercadorias.

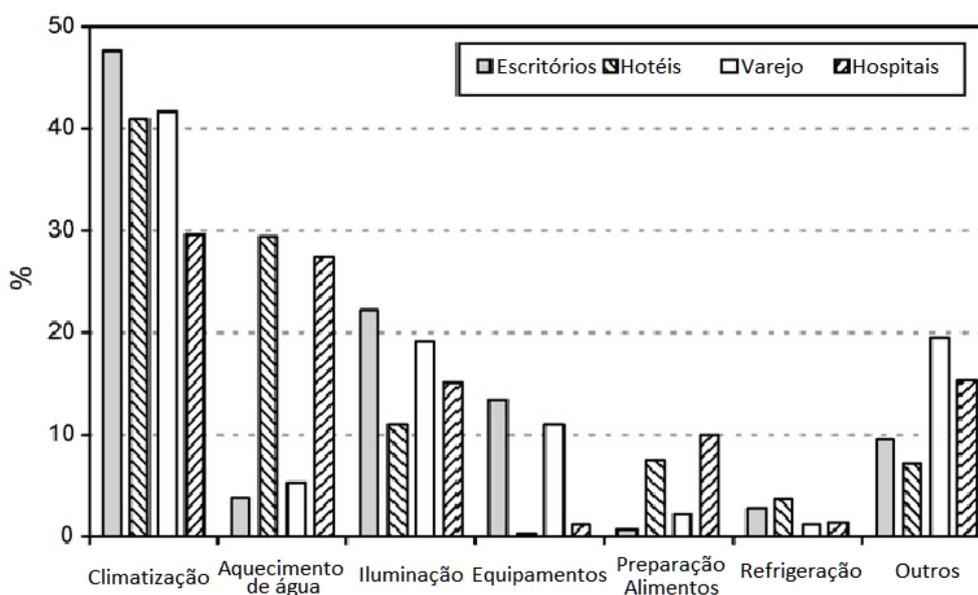
Segundo Lamberts e Westphal (2000), entre 1990 e 2000 um panorama geral da demanda de energia elétrica no país, nos setores residencial, comercial e público, mostrava que o aumento do consumo vinha acompanhando o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB), fato que não acontecia nos países desenvolvidos, onde, ao contrário do Brasil, já existiam

políticas e legislações bem definidas com relação à eficiência energética. Conforme mostrado na Figura 2.1, até hoje o aumento do consumo de energia acompanha o crescimento do PIB.

Segundo Buzelin et al. (2005), no mundo todo há um consenso entre as empresas de serviços públicos de que 30% do consumo total de energia se deve a sistemas de refrigeração e ar condicionado, representando um impacto inquestionável na demanda. Ainda, segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos - USDOE (2011), as edificações comerciais, principalmente devido aos sistemas de condicionamento de ar e de iluminação, respondem por 18,4% do consumo total de energia primária nos EUA.

No Brasil, segundo BEN (2010), o setor residencial respondeu por 23,8% do consumo total de energia elétrica, enquanto os setores comerciais e públicos, que abrigam uma porcentagem muito menor da população e onde o uso de condicionadores de ar é mais intenso, responderam por 15,0% e 8,1%, respectivamente, do consumo total. Em edifícios comerciais na cidade de São Paulo, Geller et al. (2004) observou que o consumo com iluminação corresponde a 44%, com ar condicionado a 20% e com outros equipamentos a 36%.

Segundo Pérez-Lombard et al. (2008) *apud* EIA (2006), nos edifícios dos EUA a climatização é o principal uso final com um peso de cerca de 50%, seguida pela iluminação com 15% e os equipamentos com 10%. Dessa forma, o tipo de edificação tem fundamental influência na forma como os usos finais de energia são distribuídos (Figura 2.2) e na sua intensidade energética (Tabela 2.1). Portanto, torna-se essencial desenvolver estudos independentes para tipos diferentes de uso final do edifício, visando a eficiência energética.



Fonte: adaptado de Pérez-Lombard et al. (2008)

Figura 2.2: Consumo por uso final para diferentes tipos de edificações.

Tabela 2.1: Intensidade média de consumo por tipo de edificação.

Tipo de Edificação	Intensidade de Consumo por Área [kWh/m².ano]	Taxa com Relação ao Consumo Residencial [1]
Residencial	147	1,0
Varejo	233	1,6
Escolas	262	1,8
Escritórios	293	2,0
Hotéis	316	2,1
Supermercados	631	4,3
Hospitais	786	5,3
Restaurantes	814	5,5

Fonte: adaptado de Pérez-Lombard et al. (2008)

Procel (2006) avaliou que o impacto do uso de condicionadores de ar em ambientes comerciais é de 47% e, em ambientes residenciais, de 20% do consumo global de energia. Frisa ainda que projetos que racionalizem os recursos energéticos dentro de uma técnica ambiental correta, poderá reduzir significativamente o consumo, resultando em uma economia monetária que possa amortizar em curto prazo os investimentos com sistemas de resfriamento passivo.

Rosa e Lomardo (2004) analisaram os aspectos da grande crise energética ocorrida no Brasil em 2001, listando os vários avisos encaminhados ao Governo Federal, alertando sobre o risco de desabastecimento iminente. Segundo os autores, a crise era prevista desde 1995, quando pesquisadores do COPPE-UFRJ (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro) enviaram um relatório ao Vice-Presidente da República, alertando que o modelo de privatização do setor elétrico brasileiro não permitiria a expansão da geração de energia elétrica, na medida em que seria necessário.

No Brasil, ainda segundo Rosa e Lomardo (2004), um número muito pequeno de consumidores respondia por uma grande fatia de consumo de energia, embora o consumo per capita fosse baixo comparado com o de outros países. Frisaram que alguns grandes edifícios consumiam enormes quantidades de energia, a fim de proporcionar aos seus residentes padrões de conforto de primeiro mundo, porém de forma muito menos eficiente. E que em alguns casos, estes edifícios consumiam tanta energia quanto pequenas cidades, concluindo que este uso desigual de energia é outro aspecto de um país marcado por grandes contrastes na distribuição de suas riquezas.

Assim, o Poder Legislativo brasileiro aprovou a Lei nº 10.295, de 17 de Outubro de 2001 (Brasil, 2001), também chamada de Lei da Eficiência Energética e considerada o marco regulatório da matéria no Brasil. Esta lei forneceu os instrumentos legais para a ampliação do

PROCEL a implementação da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem, que vêm alcançando resultados significativos.

Segundo Procel (2013), em 2012 o programa contribuiu para uma economia de energia elétrica de 9,1 TWh, devido à implementação de medidas de eficiência energética. Ainda, a economia em 2012 é 36% superior à alcançada no ano anterior, devido principalmente ao incremento no uso de equipamentos com Selo Procel Eletrobrás, bem como à melhoria da eficiência energética desses equipamentos. Esse resultado equivale a 1,83% do consumo total de energia elétrica no Brasil e seria suficiente para atender a 4,77 milhões de residências brasileiras por um ano, levando-se em conta que, em média, uma residência brasileira consome 159 kWh por mês

Segundo o BEN (2013), o consumo de energia elétrica no País em 2012 foi de 498,4 TWh. Deste total, segundo Procel (2013), as edificações que compreendem basicamente os setores residencial e comercial, responderam com aproximadamente 197 TWh, ou seja, 40% do consumo de energia elétrica do Brasil. Grande parte dessa energia é destinada a prover conforto ambiental aos usuários, por meio de sistemas artificiais de iluminação, climatização e aquecimento de água. Até agora, 1.158 etiquetas foram concedidas desde 2009 nas categorias Unidade Habitacional Autônoma, Edificação Multifamiliar, Áreas de Uso Comum e Comercial, porém ainda não estão disponíveis dados de economia, pois a metodologia a ser utilizada ainda encontra-se em fase de desenvolvimento.

Como se observa, portanto, apesar de um amplo conjunto de medidas estarem em curso no país, ainda não existe uma norma totalmente adaptada à realidade brasileira, que trate diretamente da eficiência energética de forma geral, ou específica para edificações. A norma ABNT NBR 16.401-1:2008 (ABNT, 2008a), por exemplo, apenas recomenda que os projetistas de sistemas centrais de climatização utilizem métodos que minimizem o desperdício de energia e adotem equipamentos de alta eficiência. Além disso, equipamentos centrais de ar condicionado, como Chillers, Condicionadores Centrais Unitários e Self-Contained ainda não são classificados pela ENCE.

Por outro lado, a norma ABNT NBR 15.220:2005 - Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005a), traz métodos de cálculo para a transmitância térmica de elementos construtivos, define o zoneamento bioclimático do território brasileiro, dividindo-o em oito zonas homogêneas quanto ao clima e apresenta diretrizes construtivas para edificações em cada uma dessas zonas bioclimáticas. Porém, poucos itens da norma têm caráter normativo, sendo efetivamente uma coletânea de recomendações técnicas para projetos civis e arquitetônicos,

mantendo ainda aberta a lacuna na legislação brasileira, no que tange a eficiência energética de edificações.

Segundo Stoecker e Jabardo (2002), o parâmetro que mede a efetividade de um sistema de refrigeração é o Coeficiente de Performance (COP), que relaciona o efeito frigorífico (frio gerado) com a quantidade de energia fornecida ao sistema para se obter o efeito desejado. Se um equipamento de ar-condicionado possui COP igual a 3, para cada kW de trabalho de eixo fornecida ao sistema, 3 kW de calor será removido do ar em circulação pelo evaporador.

Tal coeficiente mostra que estes equipamentos são muito eficientes para as condições nominais, nas quais são testados em fábrica. Porém, são acionados por formas nobres e caras de energia, como a energia elétrica, e seu uso intenso faz com que respondam pelas grandes parcelas de demanda energética, conforme citado anteriormente. Portanto, advém daí a necessidade de normas mais restritivas de eficiência energética nas edificações, de forma a minimizar a utilização da compressão mecânica de vapor, a partir de técnicas de resfriamento passivo. Trazendo benefícios aos ocupantes, empresários e, no longo prazo, ao sistema energético brasileiro como um todo.

Finalmente, com o objetivo de resolver os problemas de eficiência energética no Brasil, o Ministério de Minas e Energia lançou o Plano Nacional de Eficiência Energética – PNEf (2012), com metas e medidas para reduzir o desperdício e melhorar o aproveitamento dos recursos energéticos em um horizonte de planejamento 20 anos, até 2030. Dessa forma, o PNEf busca intensificar a aplicação da ENCE, bem como prevê datas para que se torne compulsória. Ainda, busca incorporar as diretivas da norma internacional de gestão energética ISO 50.001:2011 (ISO, 2011).

2.2 Conforto Térmico

As edificações destinadas à ocupação humana, sejam residenciais, comerciais ou públicas, são construídas com o objetivo de proteger seus ocupantes das intempéries e oferecer um ambiente agradável de moradia e trabalho. Adicionalmente, devido às condições climáticas locais, os sistemas de climatização artificial devem ser empregados para a otimização e manutenção de parâmetros ambientais, que definem as condições de conforto dos ocupantes.

Segundo ISO (1994), o conforto térmico é definido como a condição subjetiva na qual um indivíduo expressa satisfação com relação ao ambiente térmico que o circunda.

Segundo ASHRAE (2013), o julgamento de conforto é um processo cognitivo influenciado por fatores físicos, fisiológicos, psicológicos, dentre outros.

Segundo ABNT (2008b), a sensação de conforto térmico é essencialmente subjetiva e, devido às grandes variações individuais, fisiológicas e psicológicas, não é possível determinar condições que proporcionem conforto para 100 % das pessoas. Dessa forma, a norma determina os parâmetros para um ambiente em que 80% ou mais das pessoas expressem satisfação em relação ao conforto térmico, considerando um grupo homogêneo em termos de atividade física e tipo de roupa utilizada.

Segundo ASHRAE (2009), o conforto ocorre, em geral, quando a temperatura corporal é mantida em faixas estreitas, a umidade da pele é baixa e os efeitos fisiológicos de regulação térmica são minimizados. Ressalta que o conforto também depende de comportamentos, tomados de forma consciente ou não, que são motivados pelas sensações térmicas causadas pelo ambiente para reduzir o desconforto. Como exemplos, podem ser citadas as alterações nas vestimentas, alterações na atividade, mudança de postura ou localização, mudança no termostato do condicionador de ar, abertura de janelas e até abandono do ambiente.

Ainda segundo ASHRAE (2009), surpreendentemente, apesar das variáveis climáticas, condições de vida e características culturais diferirem consideravelmente ao redor do mundo, a temperatura que as pessoas escolhem para o conforto, sob condições semelhantes de vestimentas, nível de atividade, umidade e circulação de ar, é muito parecida.

Segundo Frota e Schiffer (2006), conforto térmico é a sensação que o organismo humano experimenta quando o calor produzido pelo metabolismo, compatível com sua atividade, é perdido para o ambiente sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação,

Segundo Prado (2003), o conforto térmico depende de variáveis que interferem no trabalho do sistema termorregulador, as chamadas variáveis pessoais e ambientais. As variáveis pessoais são relacionadas às taxas de metabolismo e ao isolamento térmico da vestimenta. As variáveis ambientais, por outro lado, podem ser classificadas em gerais e locais. As variáveis ambientais gerais são a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a umidade relativa e a velocidade relativa do ar. As variáveis ambientais locais, responsáveis pelo desconforto localizado, são a assimetria de temperatura radiante, as correntes de ar, a diferença vertical de temperatura do ar e a temperatura do piso. A combinação satisfatória dessas variáveis num

determinado ambiente faz com que um indivíduo tenha sensação de bem estar e, conseqüentemente, tenha a sensação de conforto térmico.

Segundo Amorim et al. (2007), além das variáveis físicas citadas anteriormente e que impactam diretamente sobre o conforto térmico, existem também variáveis psicológicas que se inserem em um conceito mais amplo no conforto. Os autores fizeram um estudo no Palácio do Itamaraty e observaram que as principais queixas dos usuários são excesso de incidência solar direta, calor, dependência do sistema de ar condicionado e falta de privacidade, devido às fachadas totalmente envidraçadas. Concluíram que tais relatos evidenciam o desejo de controle do ambiente por parte do usuário, do ponto de vista térmico e luminoso, e que além da economia direta, o maior conforto ambiental aumenta a satisfação e a produtividade dos usuários.

2.3 Climatização Artificial

2.3.1 Generalidades

Segundo Pirani et al. (2006), o condicionamento de ar é o processo que visa o controle simultâneo, num ambiente delimitado, da pureza, umidade, temperatura, e movimentação do ar. Ao contrário do que ocorre com a ventilação, estes sistemas não dependem das condições climáticas exteriores. É indispensável em:

- Ambientes de trabalho, visando aumentar o conforto do operário e conseqüentemente a produtividade;
- Ambientes onde se exigem segurança, onde se operam produtos inflamáveis ou tóxicos;
- Processos de manufatura que exigem umidade, temperatura e pureza do ar controladas, como fabricação de produtos farmacêuticos e alimentícios, salas de desenho de precisão, impressão em cores, etc.;
- Ambientes onde se processam materiais higroscópicos;
- Etapas de produção que exigem controle das reações químicas (cristalização, corrosão de metais, ação de microrganismos);

- Locais onde é necessário eliminar a eletricidade estática para prevenir incêndios ou explosões;
- Operações de usinagem com tolerância mínima;
- Laboratórios de controle e teste de materiais.
- UTI, salas cirúrgicas, etc.

Segundo ASHRAE (2007), os sistemas ar condicionado são amplamente utilizados em edifícios de escritórios, escolas, laboratórios, hospitais, lojas e especialmente em edifícios onde o controle de qualidade do ar, incluindo a temperatura e umidade, é necessária. A razão para isso é que estes sistemas têm muitas vantagens, tais como o grande potencial para uso do ar externo para condicionamento gratuito (sem uso da compressão mecânica), versatilidade com as mudanças de estação, o controle automático, a facilidade de projeto em aplicações que exigem condições internas especiais (pressurização positiva ou negativa, etc.), facilidade de manutenção e controle da qualidade do ar, etc.

Os sistemas de condicionamento de ar devem contar ainda com bons dispositivos de controle, e segundo Curtiss et al. (1994) e Fargus e Chapman (1998), o desempenho insatisfatório destes dispositivos deve-se, frequentemente, à incapacidade dos controladores convencionais em lidar com não-linearidades e de inabilidade de adaptação ao comportamento senoidal de longo prazo dos sistemas térmicos de edifícios.

2.3.2 Carga Térmica

A carga térmica pode ser definida como a quantidade de calor sensível e latente que deve ser retirada (resfriamento) ou colocada (aquecimento) em determinado recinto, a fim de proporcionar as condições de conforto desejadas, ou manter parâmetros ambientais em faixas adequadas para processos e características de uso deste recinto. Segundo ASHRAE (2009), as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento são a base do projeto básico para a maioria dos sistemas e componentes de ar condicionado. Estes cálculos afetam o tamanho das tubulações, dutos, difusores, filtros, trocadores de calor, caldeiras, chillers, serpentinas, compressores, ventiladores e todos os outros componentes de sistemas que condicionam os ambientes internos. Os cálculos das cargas de resfriamento e aquecimento podem afetar significativamente os custo

operação e manutenção de edifícios, o conforto e a produtividade dos ocupantes e, finalmente, o consumo de energia.

Além das condições de conforto, a carga térmica deve ser considerada para o correto dimensionamento de um condicionador de ar. Segundo Pietrobon et al. (1999), a carga térmica é influenciada pelos seguintes fatores:

- Orientação das fachadas e dimensões físicas do ambiente climatizado;
- Uso (finalidade);
- Informações de alvenaria, portas e janelas (quantidade, área, material);
- Ocupação (número de pessoas);
- Iluminação (natural e/ou artificial);
- Condições exteriores e interiores (temperatura e umidade);
- Equipamentos elétricos e eletrônicos (ex: computadores).

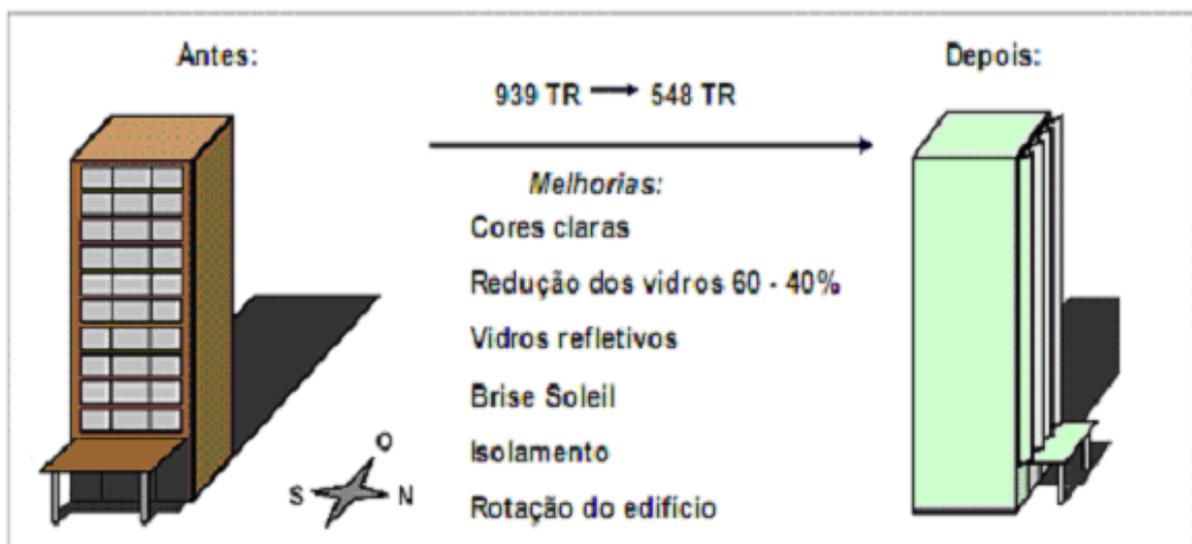
Já segundo ASHRAE (2009), a carga térmica resulta de vários processos simultâneos de transferência de calor por condução, convecção e radiação através da envoltória da edificação, de fontes internas e de componentes do sistema. As características de construção e uso do edifício, que podem afetar as cargas de resfriamento, incluem:

- Fatores Externos: paredes, tetos, janelas, clarabóias, portas, divisórias, tetos e pisos;
- Fatores Internos: iluminação, ocupação, eletrodomésticos e equipamentos;
- Infiltração: aberturas, frestas e vazamentos;
- Equipamentos: ar externo, vazamentos de ar e isolamento inadequado nos dutos, calor dissipado por ventiladores, bombas e recuperadores de energia.

Segundo ASHRAE (2007), as cargas térmicas através da envoltória podem ser dominantes, pois normalmente as fachadas externas são expostas ao sol, chuvas e ventos. Assim, outras fontes de carga tais como pessoas, luzes, aparelhos, etc, podem se tornar uma parte relativamente pequena dos ganhos de calor sensível e latente.

Segundo Cavalcante (2010) apud ASHRAE (2004), a envoltória é um dos principais elementos a serem considerados em projetos de edifícios energeticamente eficientes. Apesar de não consumir energia, a envoltória está relacionada aos ganhos de calor pela estrutura física do edifício, como fachadas, cobertura e janelas, levando conseqüentemente, ao uso mais intenso da climatização artificial e aumentando o consumo e os custos com energia elétrica. Além disso, grandes áreas envidraçadas afetam a temperatura radiante das superfícies internas, que influencia diretamente as condições de conforto térmico dos ocupantes. Por outro lado, fechamentos translúcidos podem contribuir para redução do consumo de energia com iluminação.

Neste contexto, conforme mostra Moraes (1989), a redução da carga térmica pode ser conseguida por melhorias na parte civil, e implica na utilização de sistemas de condicionamento de ar com menor capacidade, e conseqüentemente, em menores consumos de energia. A Figura 2.3, elaborada pelo Prof. Marcelo José Pirani com base em Moraes (1989), mostra uma redução de 41% da carga térmica de um prédio, obtida com medidas visando a redução da incidência solar. Portanto, projetos e metodologias para aumento da eficiência energética de edifícios devem, obrigatoriamente, passar pela otimização energética da envoltória.



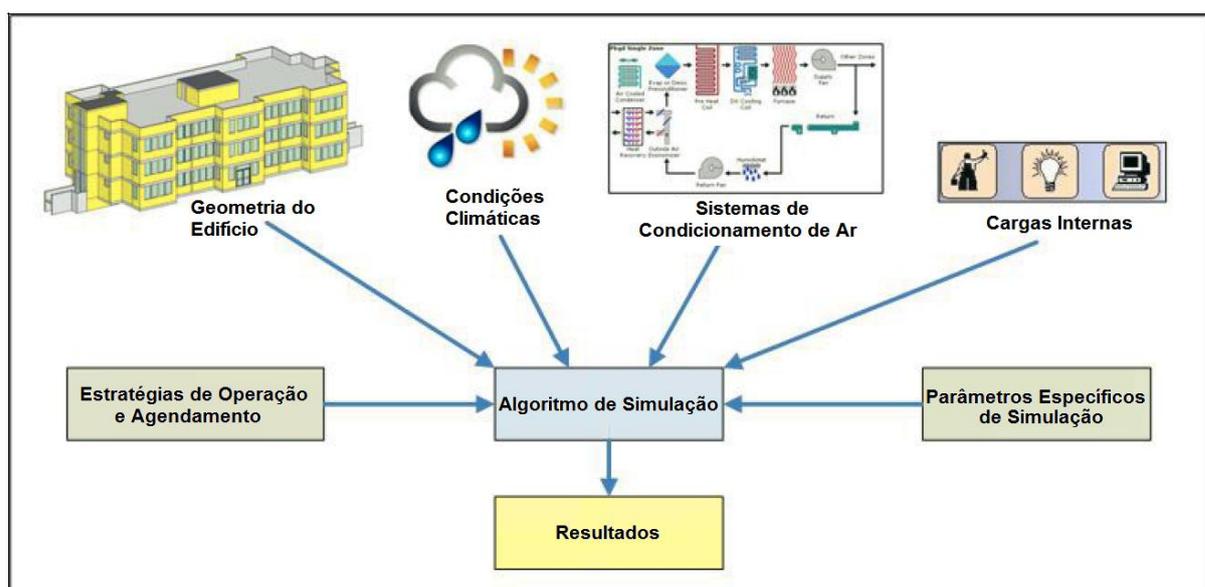
Fonte: adaptado de Moraes (1989)

Figura 2.3: Melhorias na parte civil de um prédio e conseqüente redução da carga térmica.

2.4 Simulação Termoenergética

Atualmente, a forma mais eficiente de avaliar os diversos fatores que influenciam no consumo global de energia de uma edificação são as modelagens e simulações computacionais. Através desta técnica, pode-se otimizar o projeto de um edifício visando a eficiência energética, a partir de um esforço conjunto entre os projetistas de Ar Condicionado, Civil e Arquitetura. Dessa forma, pode-se obter uma melhor combinação de componentes estruturais, equipamentos elétricos, condições de utilização, taxas de ventilação e renovação de ar, configuração do sistema (central ou distribuída), tipo de equipamento, etc. Além das simulações, os sistemas de controle baseados em inteligência artificial, como as redes neurais, têm sido cada vez mais utilizados para o controle de sistemas não-lineares e tem encontrando muitas aplicações em sistemas de ar condicionado.

A Figura 2.4 mostra os dados que, geralmente, são utilizados em simulações energéticas. Por meio de tais dados, e com a adequada seleção de parâmetros, pode-se obter os resultados desejados. Segundo Maile et al. (2007), toda simulação energética é baseada em considerações, equações e princípios da Termodinâmica. E como os processos térmicos que ocorrem em um edifício são complexos, e não totalmente compreendidos atualmente, os programas de simulação térmica podem fornecer boas aproximações, com base em equações e métodos sofisticados.



Fonte: adaptado de Maile et al. (2007)

Figura 2.4: Parâmetros e dados de entrada para simulações termoenergéticas.

Neste contexto, existem diversas ferramentas para a simulação termoenergética de edificações que foram desenvolvidas nos últimos 50 anos, segundo Crawley et al. (2008b). Destas, as mais importantes são o DOE 2.1, BLAST, TRNSYS e, mais recentemente, o EnergyPlus e o ECOTECT. Algumas se integram com ferramentas CAD para a modelagem do envoltória da edificação, conforme Lagios et al. (2010). Outras são somente interfaces gráficas para ferramentas já consolidadas, como o DesignBuilder, para o EnergyPlus e o VisualDOE, para o DOE 2.1. Outras, ainda, são desenvolvidas por fabricantes de equipamentos de ar condicionado, como o HAP da Springer-Carrier e o TRACE, da Trane.

Em nível nacional, Mendes et al. (2001) traça um panorama do uso das ferramentas de simulação computacional de edificações no Brasil, bem como das dificuldades enfrentadas pelos pesquisadores no uso destes programas. Concluem que existem desafios consideráveis para o aumento do uso da simulação computacional no Brasil, como: obtenção de dados meteorológicos de boa qualidade (incluindo a radiação solar), formas de representação adequada de edifícios ventilados naturalmente, inclusão da eficiência energética nas normas de construção e maior interoperabilidade entre as ferramentas.

2.5 Ferramentas

A seguir são apresentadas as principais ferramentas utilizadas para a simulação termoenergética de edificações, dentre as mais de 20 apuradas por Crawley et al. (2008b), e que trouxeram alguma contribuição para esse trabalho. São mostradas, também, algumas ferramentas auxiliares que foram efetivamente utilizadas nesta pesquisa.

O emprego sistemático destas técnicas de simulação pode, então, gerar uma efetiva metodologia de readequação energética para edificações comerciais. Além de trazer benefícios aos ocupantes, pode-se evitar os usuais sobredimensionamentos do equipamento de condicionamento de ar e minimizar o consumo de energia elétrica.

2.5.1 CLTD/CLF

Por muitos anos, o método CLTD/CLF (sigla para *Cooling Load Temperature Differential method with Solar Cooling Load Factors*) foi recomendado pela ASHRAE para cálculos de carga térmica. Baseados em dados tabelados, calculados pelas funções de transferência de calor por condução (*Conduction Transfer Function – CTF*), permite cálculo da carga térmica no pico de ganho de calor. Sua implementação computacional pode ser feita sem grandes dificuldades, porém outros métodos que efetuam os cálculos das CTF instantaneamente chegam a resultados mais precisos. Por este motivo, o CLTD/CLF não é mais publicado no ASHRAE Handbook – Fundamentals desde a edição de 1997, e métodos computacionais são mais recomendados. No entanto, segundo ASHRAE (2009), este método não está invalidado ou desacreditado e ainda pode ser utilizado, frisando que engenheiros experientes o têm usado com sucesso em milhões de edifícios em todo o mundo.

2.5.2 Ecotect

Desenvolvido inicialmente pela SquareOne, foi recentemente comprado pela Autodesk, fabricante do AutoCAD, como resposta ao grande crescimento do SketchUp da Google. Possui uma avançada interface gráfica que permite a modelagem 3D de edificações com alta complexidade. Executa simulações energéticas, porém com menor flexibilidade quando comparado ao EnergyPlus. Permite gerar os arquivos de entrada para diversos outros softwares de simulação, como o próprio EnergyPlus, DOE, BLAST, DesignBuilder, dentre outros. Sua grande vantagem frente aos demais é sua sofisticada ferramenta gráfica RADIANCE, que simula a incidência de raios solares sobre a edificação, permitindo conhecer os sombreamentos sobre superfícies, níveis de iluminação solar dentro das zonas térmicas, etc.

2.5.3 DesignBuilder

Semelhante ao Ecotect, permite a modelagem 3D do edifício e usa o EnergyPlus como motor de simulação. Apresenta os dados de saída de por meio de gráficos e tabelas, o que facilita

a análise. Em outras palavras, é uma interface gráfica para EnergyPlus, assim como o VisualDOE, porém mais sofisticada.

2.5.4 DOE-2

Segundo Kerrisk (1981), o DOE-2 é um programa de domínio público para análise energética de edifícios comerciais ou residenciais. O DOE-2 faz cálculos horários de consumo de energia de um edifício, a partir de informações sobre a localização do edifício, construção e operação. Para os cálculos de carga térmica e temperaturas do ar das salas, DOE-2 emprega o método do fator de ponderação, introduzido pela primeira vez por Mitalas e Stephenson (1967), que representa uma combinação entre métodos mais simples, como cálculos em regime permanente que ignoram a capacidade de envoltória armazenar energia, e métodos mais complexos, tais como cálculos de balanço de energia completos. Por muito tempo, o método do fator de ponderação foi recomendado pela ASHRAE para cálculos horários de carga térmica.

2.5.5 BLAST

Segundo Crawley et al. (2008a), o BLAST (sigla em inglês para *Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) pode prever o consumo de energia, o desempenho e os custos de operação com sistema energéticos em edifícios. O algoritmo possui três subprogramas principais: Previsão de Cargas nos Espaços, Simulação do Sistema de Distribuição de Ar e Planta Central. Assim, o BLAST pode calcular as cargas térmica horárias nos espaços a partir de dados meteorológicos, informações sobre a constituição da envoltória e características de uso. E por meio de um balanço de calor radiante, convectivo e condutivo para todas as superfícies e para o ar interno, inclui nos cálculos as cargas de transmissão, as cargas solares, os ganhos internos de calor, as cargas de infiltração e a estratégia de controle da temperatura usada para manter a temperatura do ambiente. Portanto, o BLAST pode ser usado para investigar a performance energética ou adaptar as opções de projeto para construções de quase qualquer tipo e tamanho.

2.5.6 EnergyPlus

Dentre as ferramentas de simulação energética de edificações, a que mais tem obtido destaque ultimamente é o EnergyPlus. Desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA (US-DOE, 2014a), o EnergyPlus é uma ferramenta modular de simulação que utiliza o DOE 2.1 e o BLAST, unindo as melhores características de cada um, permitindo simulações altamente detalhadas e precisas. Sua grande vantagem em relação aos demais códigos é sua capacidade de simulação integrada (em paralelo) da estrutura física, com o sistema de climatização selecionado. Na maioria dos outros códigos isto é feito de forma sequencial e sem troca automática de informações entre um e outro, conforme EnergyPlus (2013a). Atualmente é a ferramenta mais poderosa e flexível para esse fim, porém sua interface pouco amigável torna oneroso o processo de modelagem.

2.5.7 Google SketchUp

É uma ferramenta flexível e poderosa para modelagem 3D, lançada pelo Google para que os usuários de seus serviços de Internet pudessem incluir suas casas, prédios e monumentos preferidos na base de dados do GoogleEarth. O software, afinal, se mostrou tão efetivo que passou a ser usado por arquitetos e engenheiros para modelagem e até simulação térmica dos modelos gerados por este. A grande razão para o sucesso é sua interface amigável e intuitiva, que permite grande facilidade de uso, fazendo com que qualquer usuário sem familiaridade com métodos de modelagem sólida paramétrica em CAD-3D, não encontre grandes dificuldades para desenvolver modelos tridimensionais detalhados.

Hoje o Google SketchUp conta com o Google Armazém 3D, uma enorme biblioteca de mobiliários, equipamentos e elementos construtivos desenvolvidos por seus usuários ao redor do mundo, facilitando a criação de maquetes 3D para desenvolvimento de projetos de forma mais completa. O aplicativo apresenta ainda uma estrutura aberta, permitindo que diversos módulos fornecidos por terceiros, em inglês chamados plug-ins, adicionem funcionalidades e objetivos extras não previstos pelos desenvolvedores oficiais.

2.5.8 OpenStudio

O OpenStudio é um complemento (*plug-in*) para Google SketchUp fornecido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, que permite através do modelo geométrico 3D implementado, caracterizar os materiais, padrões de ocupação e utilização, densidades de iluminação e equipamentos, sistemas de ar-condicionado e todos os parâmetros necessários à modelagem térmica da edificação, para executar simulações termoenergética diretamente da interface gráfica do SketchUp, sem necessidade de exportar o modelo de um aplicativo para outro.

Assim, esta extensão do aplicativo, fornecida pelo próprio US-DOE, transforma o modelador 3D do Google em uma interface gráfica para o EnergyPlus. Atualmente, porém, o OpenStudio permite apenas a inclusão de um sistema ideal de condicionamento de ar, útil somente para uma primeira estimativa da carga térmica. Por outro lado, o complemento gera automaticamente o arquivo de entrada de dados para o EnergyPlus, baseado no modelo matemático do edifício, já com os objetos referentes aos ganhos internos de calor e às características físicas da construção.

2.5.9 Matlab/Simulink

Segundo MathWorks (2014), o Matlab é uma linguagem de programação de alto nível e um ambiente interativo para computação numérica, visualização e programação. Já o Simulink é um ambiente de diagrama de blocos para a simulação multidomínio de projetos baseados em modelos e de sistemas dinâmicos. A grande flexibilidade do Matlab permite que seja utilizado também para simulação de sistemas energéticos de edificações, incluindo ar condicionado. Sua grande vantagem neste caso é permitir a modelagem de sistemas de controle alternativos, que os simuladores de edifícios geralmente não possuem.

Por exemplo, Mendes et al. (2003) apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação com base no ambiente Matlab/Simulink para análise de desempenho energético e de vários tipos de controle automático de temperatura em um edifício. O modelo matemático apresentado é descrito em termos de variáveis estado – espaço, utilizando uma abordagem de parâmetros aglomerados para solução das equações dos balanços de massa e energia, que

governam o ar da sala. Segundo Ramallo-González et al. (2013), a abordagem de elementos aglomerados simplifica a descrição do comportamento dos sistemas físicos espacialmente distribuídos, e reduz significativamente o custo computacional com as simulações, em comparação com o EnergyPlus, por exemplo.

2.5.10 Outras

Alguns autores, ainda, utilizaram técnicas de inteligência artificial para otimização dos sistemas de condicionamento de ar e refrigeração industrial, visando calcular as variáveis operacionais e de projeto para obter o mínimo custo de implantação e operação do sistema, como em Valdes et al. (2009) e Congradac e Kulic (2009). Além das ferramentas mais sofisticada, como as de inteligência artificial, existem ainda muitas outras, que podem ser conhecidas a partir do trabalho de Crawley et al. (2008a).

2.6 Ventilação sob Demanda (DCV)

Em geral, as taxas de insuflação de ar externo, ou de renovação, para remoção de contaminantes, é especificada por normas que definem níveis mínimos para a qualidade do ar interior. A ASHRAE Standard 62:2010 (ASHRAE, 2010a) e sua equivalente brasileira ABNT NBR 16.401-3:2008 (ABNT, 2008c), são exemplos de normas que especificam taxas básicas de renovação de ar por pessoa, em $L.s^{-1}.pessoas^{-1}$, e por área total do ambiente condicionado, em $L.s^{-1}.m^{-2}$.

Outro exemplo de legislação referente à qualidade do ar interno no Brasil é a Portaria nº 3.532, de 28 de Agosto de 1998, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 1998), que confere a proprietários de sistema de condicionamento ar com capacidade acima de 5 TR, a atribuição de garantir adequada renovação do ar de interior dos ambientes climatizados, com vazão mínima de $27 m^3.h^{-1}.pessoa^{-1}$ para o ar externo. Ainda estabelece níveis mínimos de filtragem para o ar externo bem como para suas condições de captação, além de especificar procedimentos periódicos de manutenção do equipamento e troca dos filtros.

Segundo Apte (2006), os equipamentos de tratamento de ar geralmente empregados em edificações comerciais, utilizam sistemas de ventilação mecânica dotados de controladores de vazão (dampers) que podem desviar uma porcentagem de ar recirculado para o expurgo e introduzir um fluxo igual de ar externo no ambiente, calculado com base nas recomendações das normas vigentes. Porém, a maioria destes sistemas permite apenas operação com uma posição fixa do controlador e vazão de renovação constante.

Segundo Persily et al. (2005), dependendo do tipo de projeto, das características de ocupação do ambiente e do perfil de geração interna de CO₂, pode-se ter um ambiente sobreventilado, com concentrações de contaminantes (como o CO₂ por exemplo) menores que os níveis recomendados nas normas citadas, o que geralmente ocorre em edifícios de escritórios. Por outro lado, pode-se ter também um ambiente com ventilação insuficiente, caso comumente encontrado em salas de aula e auditórios, segundo CARB/DHS (2003).

Segundo Apte (2006), edifícios sobreventilados desperdiçam energia, trazendo pouco ou nenhum benefício para os ocupantes, enquanto edifícios subventilados podem ter efeitos adversos significativos sobre as pessoas. Portanto, a ventilação com controle de demanda é uma abordagem técnica para melhor adequar as taxas de ventilação do edifício à sua ocupação instantânea, diminuindo o consumo de energia e melhorando as condições de conforto.

Segundo ASHRAE (2010a), nos sistemas DCV comumente encontrados no mercado o controle da ventilação mecânica é feito por sensores de CO₂ que proporcionam uma medida bastante precisa da ocupação do ambiente, já que a taxa de geração de CO₂ é proporcional ao número ocupantes. Assim, pode-se modular a taxa de ar externo para renovação, de acordo com a ocupação do ambiente, mantendo o ambiente sempre saudável e com concentração interna de CO₂ de 700 ppm acima do ambiente externo (em torno de 1100 ppm, considerando 400 ppm para a concentração externa) e com mínimo consumo de energia elétrica.

Atualmente, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos tendo como objeto de estudo a Ventilação Sob Demanda, devido às suas inúmeras vantagens. Porém, quando apresentada na década de 70, a técnica despertou pouco interesse e apenas nos anos 90, quando a preocupação com a demanda energética aumentou, é que começou a ser efetivamente estudada e implantada.

Spengler e Sexton (1983), expressaram a qualidade do ar interno como problema de saúde pública, frisando que, apesar das taxas de ventilação serem fixadas em norma, os ocupantes frequentemente ficavam expostos a uma grande gama de poluentes gerados pela própria atividade comercial desempenhada no ambiente. Frisam que a natureza complexa dos

ambientes internos em nações tecnologicamente avançadas (incluindo materiais sintéticos de construção, edifícios energeticamente eficientes, aplicações de aquecimento e cozimento sem ventilação adequada, produtos de limpeza e higiene pessoal, etc.) torna possível exposições internas generalizadas a um amplo espectro de produtos químicos no ar. Além disso, apesar de muitos poluentes internos ficarem abaixo dos limiares de percepção, exposições a longo prazo podem causar aumento das taxas de morbidade e mortalidade. Os autores ainda frisam que apesar do grau de risco à saúde não ter sido estabelecido, as preocupações levaram a intervenções governamentais para limitar as exposições internas ao tabaco, fumaça, amianto, formaldeído e microorganismos. Quanto ao dióxido de carbono proveniente da atividade metabólica e combustão, a concentração interna de CO₂ frequentemente encontrada ficava entre 2.000 ppm e 3.000 ppm (partes por milhão).

Warren e Harper (1991), utilizando um perfil de ventilação baseado na concentração de dióxido de carbono, simularam um auditório submetido a flutuações de ocupação no Reino Unido. Como resultado, reportaram que uma redução de 50% no consumo de energia elétrica para aquecimento poderia ser alcançada se o auditório, que utilizava 100% de ar externo, recebesse um sistema com controle de ventilação por CO₂.

Schell et al. (1998), apresentaram um guia para a implantação da ventilação sob demanda baseado na interpretação IC 62-1989-27 da ASHRAE Standard 62:1989 (ASHRAE, 1989a). Nesta foi estabelecido que, baseando-se na concentração de CO₂, pode-se identificar uma redução na ocupação e, conseqüentemente, diminuir a ventilação de renovação no ambiente. Dessa forma, economiza-se energia sem deixar de atender a taxa mínima de ventilação por pessoa exigida por norma e, principalmente, sem comprometer a qualidade do ar interno.

Schell e Inthout (2001), fizeram uma revisão do estado da arte da ventilação sob demanda e seus vários componentes, como os sensores, frisando que este tipo de controle pode se tornar tão comum quanto os usuais controles termostáticos.

Römer (2001), simulou uma casa de baixo consumo energético no programa TRNSYS 14.2 para um caso base sem DCV e com ventilação contínua durante dia e noite e, outros dois cenários: um com 50% da ventilação durante o ano todo e outro com 50% da ventilação apenas durante os períodos desocupados. Como resultado, obteve 15% de economia no primeiro cenário e 20% no segundo, ambos com relação ao caso base.

Pavlovas (2004), utilizou o software ICE (Indoor Climate and Energy) para simular um edifício multifamiliar localizado na Suécia quanto a várias estratégias de ventilação sob demanda. Tomando como referência um sistema com vazão volumétrica de renovação constante, foram simulados os controles de ventilação com base na concentração de CO₂ (fixadas em 800 ppm e 1200 ppm), na umidade relativa (UR) (fixadas em 60% e 80%) e na presença de pessoas (ventilação mínima de 10 l.s⁻¹ sem ocupação e 30 l.s⁻¹ para ambiente ocupado). Para os controles por CO₂ e UR o potencial de economia obtido foi maior que 50%, enquanto o controle de presença atingiu economia de 20%, ambos com relação ao caso de referência.

Congradac e Kulic (2009), simularam um sistema VAV com central de água gelada utilizando algoritmos genéticos como método de otimização. A simulação foi feita em ambiente Matlab/Simulink com posterior calibração em EnergyPlus e reportou, para uma concentração externa de CO₂ de 300 ppm, uma redução no fluxo de água gelada de 38% quando operando a uma concentração interna de 400 ppm, 72% a 600 ppm e 83% a 800 ppm.

Hong e Fisk (2009), avaliaram os potenciais de economia de energia em escritórios, que podem ser proporcionados pelo DCV, em cinco zonas climáticas típicas do estado da Califórnia, utilizando o EnergyPlus. Foram testadas três densidades de ocupação e dois níveis de ventilação mínima para diversificar a gama de condições de projeto. Da análise do custo do ciclo de vida do projeto concluiu-se que, em geral, o sistema DCV apresenta boa viabilidade econômica se a taxa típica de ventilação sem DCV for muito maior que a mínima estipulada em norma.

Maripuu (2009), em sua tese de doutorado, explorou todos os aspectos técnicos e práticos da abordagem DCV, com análises reais e estudos de caso. Ainda, seu monitoramento de um edifício de escritórios ao longo de um ano mostrou que em 90% do tempo a ocupação real é igual ou menor que 53%.

Petrone et al. (2011) fizeram uma simulação multifísica de diferentes sistemas de ventilação, visando avaliar o seu impacto no conforto dos espectadores de um cinema. Utilizaram as equações de conservação da massa, energia e momento para definir os campos de velocidade, temperatura e concentração de CO₂ para cada situação estudada. As soluções obtidas mostraram a distribuição espacial da temperatura, velocidade do ar, concentração de CO₂, etc., buscando avaliar a efetividade da ventilação em cada região da sala, sobretudo nos pontos próximos aos ocupantes.

Portanto, a Ventilação Sob Demanda baseada na concentração interna de CO₂ é uma técnica muito promissora para manutenção da qualidade do ar em níveis saudáveis e ainda para contribuir com a redução da demanda energética, fato bastante desejável atualmente. Por isso, a técnica DCV será analisada neste trabalho, a fim de avaliar seu desempenho sob condições de clima e características de ocupação tipicamente brasileiras.

2.7 Economizador de Ar Externo (EAE)

Segundo a ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2010b), existem dois tipos de economizadores para sistemas de condicionamento de ar: os Economizadores Lado Água (*Water Side Economizer*) os e Economizadores Lado Ar (*Air Side Economizer*). Um economizador de água é um sistema de climatização através do qual o ar de insuflação é resfriado com água, que por sua vez, é refrigerada por processos de transferência de calor e massa com o ambiente, sem utilização da compressão mecânica de vapor.

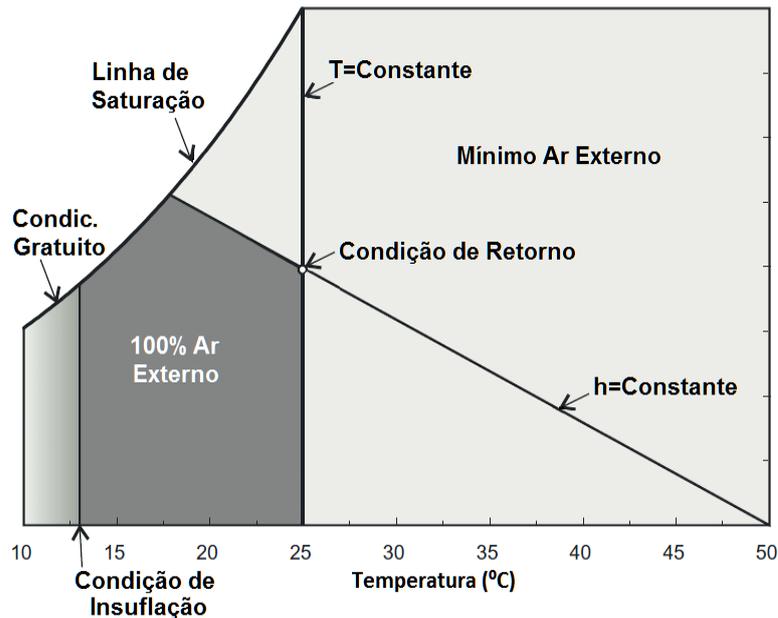
Já o Economizador Lado Ar, utilizado neste trabalho, é definido por ASHRAE (2010b) como um arranjo de dutos, dampers e controladores automáticos que, em conjunto, permite que um sistema de climatização forneça ar externo em quantidade suficiente para reduzir ou eliminar a necessidade de resfriamento por compressão mecânica de vapor, durante períodos com clima ameno ou frio. Dessa forma, o Economizador de Ar Externo (EAE), é uma excelente alternativa para reduzir o uso de energia elétrica em uma grande variedade de aplicações, desde edifícios comerciais, passando por ambientes de processos produtivos, até centros de processamento de dados.

Segundo Seem e House (2010), os edifícios comerciais geralmente necessitam de refrigeração durante o ano todo, porque os ganhos internos de calor podem exceder as perdas pela envoltória mesmo quando as condições exteriores estão consideravelmente frias, fazendo com que equipamentos de refrigeração por compressão de vapor sejam comumente utilizados para estabelecer as condições de conforto. No entanto, quando as condições exteriores são suficientemente favoráveis, um economizador de ar ou de água pode ser usado para fornecer o arrefecimento gratuito (termo com origem na expressão *Free Cooling*, do inglês), que pode reduzir significativamente ou eliminar a necessidade de refrigeração mecânica.

Segundo EnergyPlus (2013b), as estratégias de controle do Economizador de Ar Externo existentes e que podem ser simuladas pelo algoritmo EnergyPlus são:

- **Temperatura de Bulbo Seco fixa:** se o ar externo possui temperatura de bulbo seco menor que um valor especificado com base nas condições climáticas locais, o EAE é habilitado;
- **Diferencial de Temperatura de Bulbo Seco:** se o ar externo possui temperatura de bulbo seco menor que a temperatura de bulbo seco do ar interno do ambiente condicionado, o EAE é habilitado;
- **Entalpia fixa:** se o ar externo possui entalpia menor que um valor especificado com base nas condições climáticas locais, o EAE é habilitado;
- **Diferencial de Entalpia:** se o ar externo possui entalpia menor que a entalpia do ar interno do ambiente condicionado, o EAE é habilitado;
- **Entalpia eletrônica:** é uma combinação especial entre as estratégias da temperatura de bulbo seco fixa e da entalpia fixa, que a norma ASHRAE Standard 90.1 chama de “*Electronic Enthalpy*”. Trata-se de valor limite para a umidade absoluta do ar externo, que é calculado em função da temperatura de bulbo seco do ar externo, por meio de uma curva quadrática ou cúbica, e é comparado com a umidade absoluta (medida) do ar externo. Assim, se a umidade real é menor que a calculada, o EAE é habilitado;
- **Temperaturas de Ponto de Orvalho e de Bulbo Seco fixas:** se o ar externo possui, ao mesmo tempo, temperatura de ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco menores que os valores especificados, o EAE é habilitado;
- **Diferenciais de Temperatura de Bulbo Seco e Entalpia:** se o ar externo possui, ao mesmo tempo, temperatura de bulbo seco e entalpia menores que os valores medidos para o ar interno, o EAE é habilitado;

Assim, o principal objetivo do EAE é controlar a vazão de ar externo conforme as condições externas, definindo em que circunstâncias deve-se utilizar a taxa máxima (em geral 100%) ou a mínima (valores especificados em normas de conforto térmico). Conforme apresentado em Seem e House (2010), a Figura 2.5 mostra as linhas de transição na carta psicrométrica, delimitando as área de resfriamento gratuito (cinza gradiente), a área de 100% de ar externo (cinza escuro) e a área de mínimo ar externo (cinza claro).



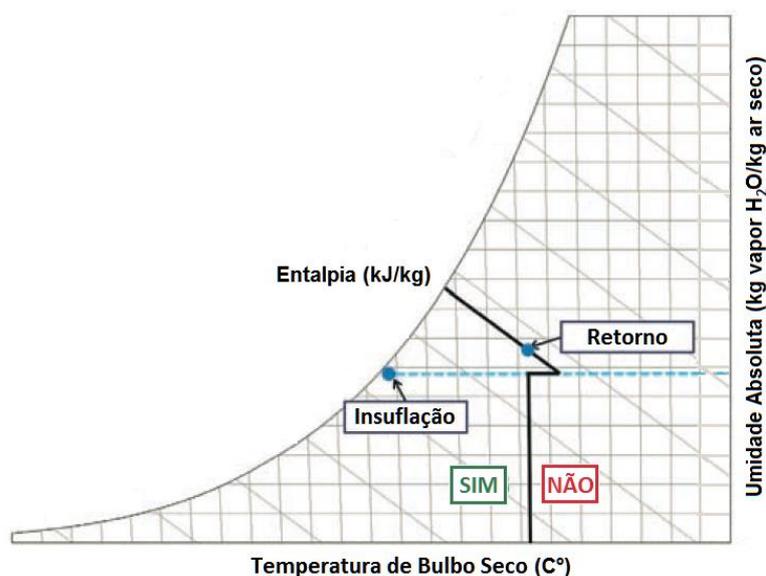
Fonte: adaptado de Seem e House (2010)

Figura 2.5: Linhas de transição entre as áreas de atuação do EAE na carta psicrométrica.

Na área de resfriamento gratuito, a temperatura do ar externo é menor que a temperatura de insuflação (geralmente em torno de 13 °C), assim, toda a carga térmica interna pode ser removida apenas com a ação do ar externo frio, de forma totalmente passiva. Nestas condições, a vazão de ar externo deve ser modulada e misturada com uma fração da vazão de retorno para que se mantenham as condições de conforto nos ambientes internos.

Na área cinza escuro, onde se usa 100% de ar de renovação, a temperatura do ar externo fica entre a temperatura de insuflação e a temperatura interna de conforto. Nestas condições, a vazão de ar externo pode atender parte da carga térmica e, em conjunto com a compressão mecânica de vapor, garante-se as condições de conforto. Finalmente, na grande área cinza claro, as condições externas fazem com que o ar de renovação introduza alta carga térmica na Serpentina de Resfriamento e Desumidificação (SRD), e sua vazão deve ser a mínima possível.

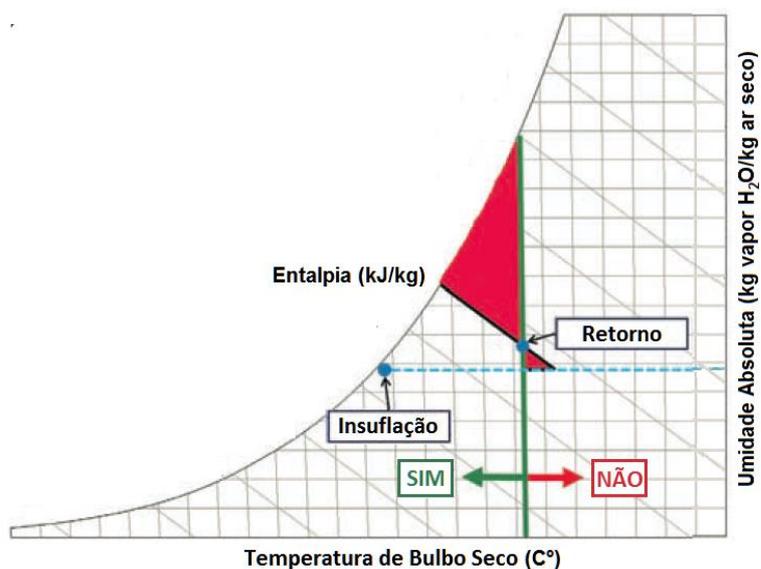
Porém, de acordo com Taylor e Cheng (2010), toda estratégia de controle do ar externo pode levar a erros de julgamento por parte do controlador EAE, por suas próprias características teóricas, levando ao aumento da carga térmica na SRD e, conseqüentemente, ao aumento de consumo de energia elétrica. Segundo os autores, apenas um controlador que opere segundo a linha ideal de transição mostrada na Figura 2.6 (linha cheia preta) poderia assegurar um controle adequado da vazão de ar externo em uma aplicação EAE.



Fonte: adaptado de Taylor e Cheng (2010)

Figura 2.6: Linha ideal de transição para um controlador EAE.

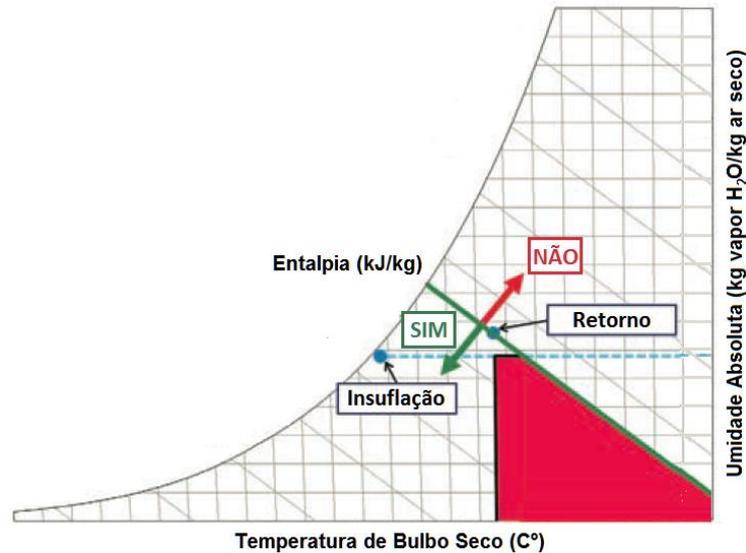
Utilizando-se a estratégia do controle diferencial da temperatura de bulbo seco, o controlador EAE levará a resultados insatisfatórios em toda a área vermelha da Figura 2.7. No triângulo superior (maior), o controle habilitará o economizador e utilizará 100% de ar externo em uma condição onde a entalpia do ar externo é maior que a do ar interno (retorno), com alta umidade, aumentando a carga térmica latente na SRD. Quanto ao triângulo inferior (menor), o controlador utilizará a vazão mínima de ar externo a despeito da entalpia externa ser menor que a interna, e o uso de 100% de ar externo levaria a melhores resultados.



Fonte: adaptado de Taylor e Cheng (2010)

Figura 2.7: Área de erro teórico para a estratégia de controle diferencial da temperatura de bulbo seco, na carta psicrométrica.

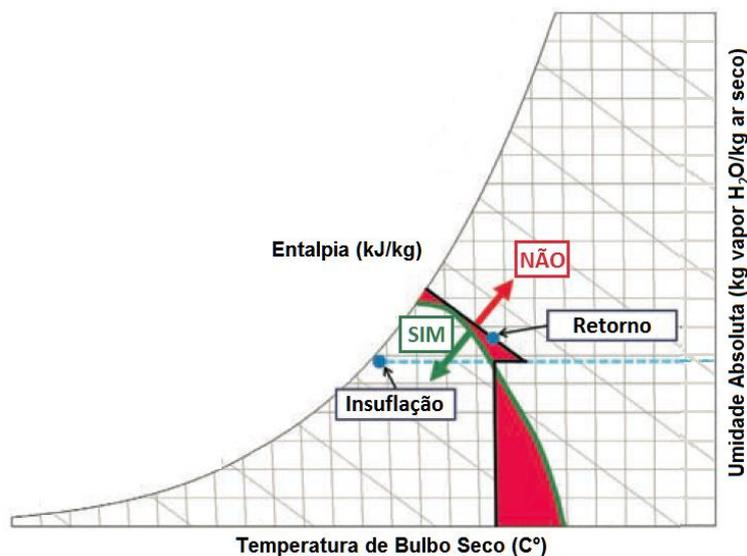
De forma similar, o controle diferencial de entalpia levará a erros em todo o trapézio vermelho da Figura 2.8. Nesta área, esta estratégia utilizará ar externo máximo em uma condição de baixa umidade, porém alta temperatura, aumentando a carga sensível na SRD e podendo levar a aumento no consumo.



Fonte: adaptado de Taylor e Cheng (2010)

Figura 2.8: Área de erro teórico para a estratégia de controle diferencial de entalpia, na carta psicrométrica.

Quanto à estratégia da Entalpia Eletrônica, em que a linha de transição é definida por uma curva da umidade absoluta em função da temperatura de bulbo seco, os erros teóricos são menores. Observa-se que a curva utilizada como exemplo na Figura 2.9 se ajusta melhor à linha ideal de transição, porém ainda existem erros teóricos associados a esta estratégia, representados pelas áreas destacadas em vermelho.



Fonte: adaptado de Taylor e Cheng (2010)

Figura 2.9: Área de erro teórico para a estratégia entalpia eletrônica, na carta psicrométrica.

Ainda segundo Taylor e Cheng (2010), além dos erros teóricos mostrados nas figuras anteriores, ainda podem ocorrer inúmeros erros associados a precisão dos sensores de temperatura e umidade, além de erros causados por manutenção inadequada ou inexistente dos sistemas. Por todos estes fatores, os autores são céticos quanto ao funcionamento prático dos economizadores, sobretudo aqueles com base na entalpia. Porém, eles mesmos ressaltam que os impactos de cada um desses erros na eficácia do sistema, medida pela economia de energia alcançada, depende sobretudo das características do clima em cada localidade.

Outro problema decorrente da aplicação dos economizadores de ar refere-se ao controle da umidade. Em climas secos, o aumento da vazão de ar externo pode diminuir a umidade relativa interna para valores abaixo da faixa aceitável de conforto. Por outro lado, em climas úmidos ocorre o oposto e os ambientes climatizados passam a apresentar alta umidade relativa, que além de influenciar no conforto, pode causar condensação de umidade nas superfícies, além de favorecer a proliferação de fungos e o aparecimento de mofo.

Lee e Chen (2013) analisaram os potenciais de uso de economizadores de ar em centros de processamento de dados, para 17 zonas climáticas classificadas por ASHRAE (2010b), levando-se em conta os dispêndios adicionais de energia com umidificação e desumidificação, para manter as condições adequadas de funcionamento para os equipamentos. Os autores apuraram que em zonas de clima frio e seco, onde a umidade relativa mínima média do ar exterior para todo o ano ficou próxima de 30%, a energia consumida para umidificação foi maior do que a redução no consumo proporcionada pelo resfriamento gratuito. Da mesma forma, em zonas climáticas com umidade relativa média em torno de 71%, a quantidade de energia consumida para desumidificação foi maior do que as economias obtidas pelo EAE.

Ainda quanto às disponibilidades climáticas para o uso de economizadores, Inard et al. (2011) avaliaram que os potenciais resfriamento gratuito devem ser avaliados preferencialmente por métodos baseados em análises dinâmicas à análises em regime permanente, uma vez que a variação de temperatura interna deve ser considerada de forma adequada. Apresentaram um método baseado no balanço de energia das perdas e ganhos de calor e o aplicaram a 14 salas de edifícios comerciais. Trabalhos como este também mostram a grande importância climática no desempenho eficiente de um economizador de ar.

Assim pode-se concluir que o resultado prático proporcionado pelo EAE depende do clima de cada localidade. Portanto, a viabilidade do uso de um economizador deve ser definida como base em seu desempenho no clima da localidade de interesse. Por isso este trabalho se propõe a avaliar o desempenho dos economizadores nas condições climáticas do Brasil, bem como sua adaptação à técnica DCV, de modo a obter o máximo benefício dos dois sistemas. Neste contexto, portanto, as simulações computacionais podem prestar grande auxílio.

CAPÍTULO 3

3. O Uso do EnergyPlus para Simulações Energéticas

3.1 Introdução

Antes de entrar na modelagem propriamente dita, é interessante apresentar os detalhes e particularidades da modelagem em EnergyPlus, apurados durante o trabalho. O EnergyPlus é um software para simulação termoenergética de edificações, que engloba todos os sistemas e características físicas da instalação. Seus cálculos permitem a análise detalhada de todos os aspectos energéticos de um projeto, antes mesmo que ele saia do papel. Dessa forma, podem-se avaliar os impactos no consumo, demanda e condições internas da edificação, que as mais diversas soluções arquitetônicas, estéticas ou físicas podem causar no empreendimento final.

Segundo Crawley et al. (2001), em artigo publicado pelos desenvolvedores do EnergyPlus, a partir do grande salto tecnológico das ferramentas de simulação numérica computacional que teve início nos anos 70, por mais de duas décadas, o governo dos EUA patrocinou o desenvolvimento de dois programas de simulação energética horária de edificações: o BLAST e o DOE. Ambos se tornaram amplamente utilizados em todo o mundo e a principal diferença entre eles era o método de cálculo de carga utilizado. Enquanto o DOE usava uma abordagem de fator de ponderação para os cálculos de transferência de calor o BLAST utilizava uma abordagem de balanço de calor.

Assim, os dois programas eram compostos por centenas de sub-rotinas que trabalhavam em conjunto para simular os fluxos energéticos de calor e massa, ao longo das superfícies ativas de troca de calor de um edifício. Em alguns casos, as sub-rotinas do DOE eram mais precisas e, em outros, as sub-rotinas do BLAST levavam a resultados superiores.

Projetados na época dos computadores *mainframe*, e devido às suas características particulares, a expansão das funcionalidades tanto do BLAST como do DOE, foram efetuadas por diversos autores diferentes ao longo de décadas de desenvolvimento. Muitas vezes, este fato resultava no chamado "código espaguete", onde dados e sub-rotinas implementados para um recurso de simulação em especial, acabava se espalhando por todo o programa. Dessa forma, os códigos de programação tornaram-se extremamente difíceis de serem compreendidos, e modificar quaisquer destes códigos sempre requeria um investimento extraordinário de tempo e dinheiro.

Além dos problemas de desenvolvimento, tanto no BLAST como no DOE, as rotinas de cálculo da carga térmica do ambiente e do sistema de condicionamento de ar, eram simuladas de forma sequencial e sem troca de dados entre elas. E como as condições calculadas para determinados tempo de simulação irão influenciar no passo de tempo seguinte, supondo um modelo quasi-estático, esta característica de programação se constituía na maior deficiência de ambos códigos computacionais em questão. E gerava uma grave imprecisão na previsão da temperatura interna de ambientes condicionados. Deve-se ressaltar que a correta previsão das temperaturas dos espaços é crucial para projetos de eficiência energética de sistemas prediais, considerando que o tamanho do sistema, tamanho da planta, o conforto e a saúde dos ocupantes, etc., são dependentes da temperatura do espaço.

Assim, ainda segundo os autores, houve um forte consenso de que era necessária uma nova ferramenta de simulação, mais flexível e robusta, com capacidades adicionais e melhores condições de uso e desenvolvimento. Neste sentido, uma das maiores prioridades era que a nova ferramenta fosse capaz de efetuar simulações integradas, com cargas e sistemas sendo solucionados simultaneamente (em paralelo), para melhor precisão nos cálculos de temperatura e novas possibilidades de simulação, como a utilização dos modelos de previsão de conforto térmico, como o de Fanger (1970), por exemplo.

Por estas razões, um projeto do Departamento de Energia do governo dos Estados Unidos (US-DOE), iniciado em 1996, buscou unir os dois algoritmos a fim de combinar as melhores características de cada um e superar suas limitações. Este novo programa de simulação, lançado em Abril de 2001, ficou conhecido como EnergyPlus e baseou-se nas principais capacidades e características do BLAST e do DOE.

Como resultado, o EnergyPlus deu origem à nova geração de softwares de simulação termoenergética de edificações e se consolidou como um dos mais completos, precisos e detalhados. Assim, o algoritmo permite simulações extensas de sistemas com alta complexidade

de detalhes, tanto do ponto de vista físico como de ocupação e operação, onde diversos módulos interdependentes se encarregam de cada aspecto da edificação e trocam dados entre si a cada incremento de tempo da simulação.

Dentre todas as funções e capacidades de simulação do EnergyPlus, o BLAST contribuiu com seu sofisticado modelo de balanço térmico de ambientes, que efetua cálculos simultâneos dos processos de transferência de calor por condução, radiação e convecção a cada incremento de tempo da simulação, bem como da transferência combinada de calor e de massa através dos componentes da envoltória a partir das características da construção. Também, contribuiu com os modelos de conforto humano com base na atividade, temperatura de bulbo seco interna, umidade e radiação, além de fornecer modelos de inúmeras serpentinas de aquecimento e resfriamento de equipamentos reais.

Por outro lado, o DOE contribuiu com seu Modelo de Céu Anisotrópico, que utiliza a posição do sol para um melhor cálculo da radiação solar direta e difusa em superfícies inclinadas. Contribuiu também com as capacidades de cálculos avançados de transferência de calor através de superfícies transparente, a partir da ferramenta WINDOW5, que conta com modelos de janelas prontas, além da possibilidade de inserir tipos personalizados de vidro multicamada. Ainda do DOE, os controles de iluminação com base na luz solar, os cálculos da iluminação interior a partir de janelas e claraboias e os efeitos do uso de dispositivos de escurecimento nas janelas, sobre as cargas de aquecimento e refrigeração, foram incorporados no EnergyPlus. Do DOE também vieram inúmeros modelos de equipamentos reais.

Ainda segundo Crawley et al. (2001), as simulação integradas também permitem aos usuários avaliar um número de processos que nem o DOE nem o BLAST podiam simular corretamente. Por estas características de desenvolvimento, então, o EnergyPlus tem três componentes principais: um gerenciador de simulação (*Simulation Manager*), um módulo de simulação de balanço de calor e massa baseado em BLAST e um módulo gerenciador da simulação dos sistemas existentes no edifício (*Building Systems Simulation Manager*).

Assim, os cálculos do balanço de calor e massa através das Funções de Transferência de Calor por Condução – CTF (do inglês, *Conduction Transfer Function*), são feitos pelo módulo BLAST. E o gerenciador de simulação dos sistemas do edifício manipula a comunicação entre o algoritmo do balanço de calor e vários módulos relativos aos sistemas HVAC e aos sistemas de circulação de fluidos, como serpentinas, caldeiras, chillers, bombas, ventiladores e outros equipamentos e componentes.

Quanto à modelagem em EnergyPlus, pelo seu parentesco com o DOE e o BLAST, a entrada de dados do modelo para simulação é totalmente efetuada por meio de arquivos de texto simples (ASCII), que podem ser criados ou editados no Bloco de Notas do sistema operacional Windows. Estes arquivos de texto, então, contêm todas as informações necessárias para a completa caracterização e simulação do caso em estudo.

Para que as simulações termoenergéticas possam ser realizadas em EnergyPlus, são necessários dois modelos de entrada em forma de arquivo texto, que constituem a entrada completa de dados para o programa. O primeiro arquivo de dados é o modelo termofísico em si, com todos os aspectos físicos da edificação, como dados da envoltória, dos equipamentos condicionadores de ar e do uso do empreendimento. Este arquivo é chamado *Input Data File* (Arquivos de Entrada de Dados) e possui a extensão IDF. A estrutura do arquivo IDF é apresentada na Seção 3.4.

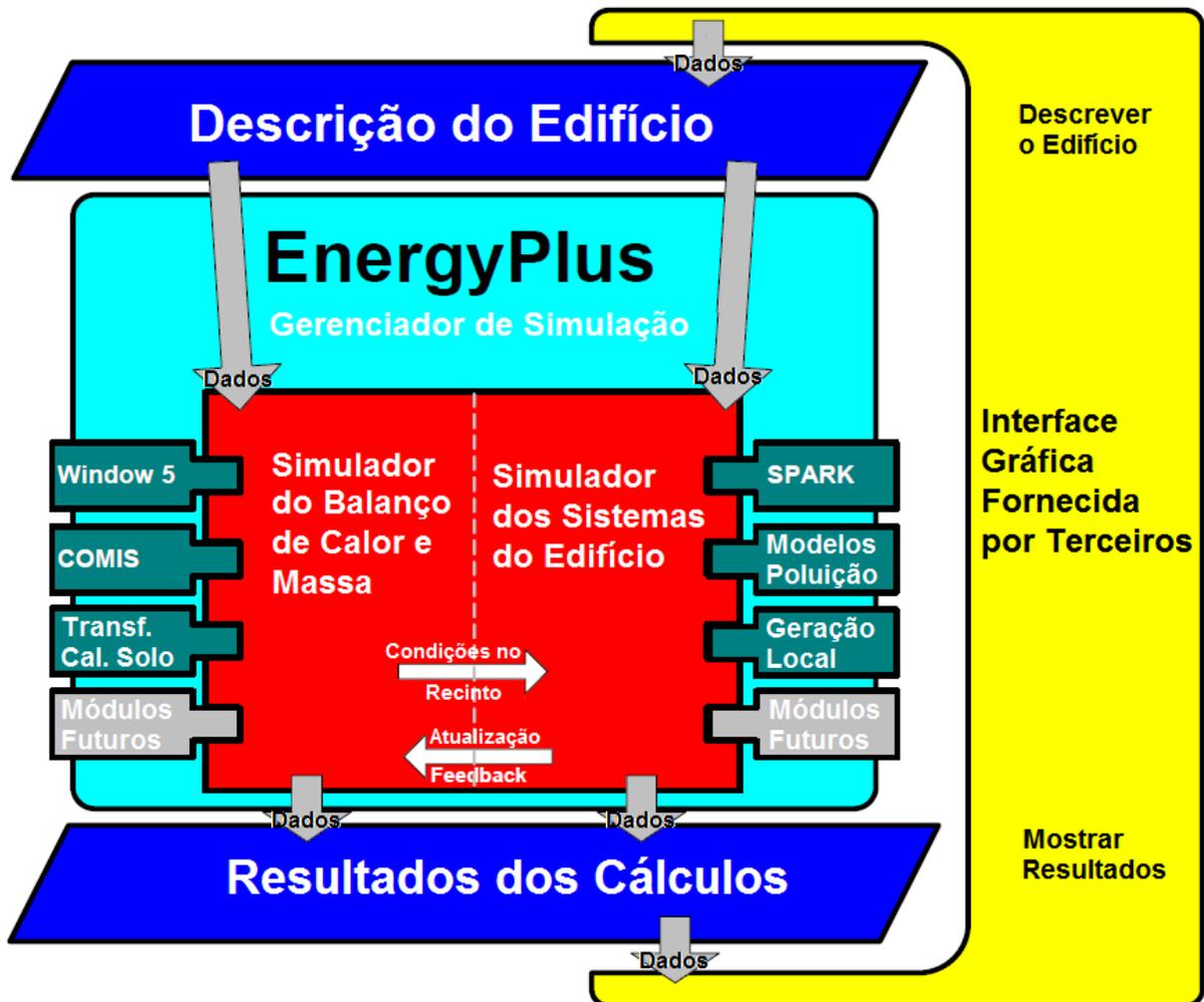
O segundo arquivo de entrada de dados é o modelo climatológico para a localidade em questão, que é formado por uma serie completa de dados climáticos para as 8760 horas do ano. Este modelo é chamado *EnergyPlus Weather File* (Arquivo Climático EnergyPlus) e possui a extensão EPW. É definido a partir de dados históricos coletados em estações climáticas, com os devidos tratamentos estatísticos necessários à aplicação desejada e deve ser selecionado de uma das inúmeras bases de dados disponíveis na internet. Neste trabalho, para a cidade de São Paulo, localidade onde a edificação simulada se situa, será utilizado um arquivo climático IWEC (International Weather for Energy Calculations), apresentado por ASHRAE (2012). Mais detalhes e informações sobre a seleção do arquivo climático são dados na Seção 3.5.

3.2 Módulos de Simulação

Segundo EnergyPlus (2013c), um módulo é uma construção em linguagem de programação Fortran 90/95 que pode ser usado de várias maneiras. No EnergyPlus, seu principal uso foi feito no sentido de segmentar um programa bastante grande em partes menores e mais facilmente gerenciáveis. Cada módulo é um pacote separado do código fonte armazenado em um arquivo próprio e toda a coleção de módulos, quando compilado e conectado aos demais, formam o código executável do EnergyPlus. Cada módulo contém o código-fonte para as estruturas de dados e procedimentos estreitamente relacionados.

Dessa forma, segundo EnergyPlus (2013b), a maior diferença entre o EnergyPlus e os softwares com processamento de entrada de dados mais tradicional, é que o EnergyPlus é modular também na aquisição dos dados e dos detalhes para a simulação. Devido a essa estrutura modular, cada módulo do EnergyPlus é responsável por “obter” seus próprios dados de entrada, e obtém toda a informação necessária na primeira vez em que é chamado e os dados que não são necessários para uma simulação em particular não são processados.

A Figura 3.1 mostra a estrutura do EnergyPlus com seus diversos módulos interdependentes, onde se nota sua flexibilidade quanto à novas funcionalidades e ferramentas fornecidas por terceiros, como interfaces gráficas.



Fonte: adaptado de Crawley et al. (2004)

Figura 3.1: Estrutura de processamento de dados no EnergyPlus.

Com o entendimento da estrutura modular do EnergyPlus, torna-se mais fácil entender a estrutura de entrada de dados baseada em objetos, que será apresentada nas Seções 3.3 e 3.4.

3.3 Objetos

Enquanto os módulos fazem o processamento dos dados e executam vários tipos de tarefas dentro da simulação numérica em EnergyPlus, toda a interface com o usuário, a partir do arquivo de entrada de dados IDF, é feita pelos objetos. Segundo EnergyPlus (2013b), um objeto é um registro que armazena determinada quantidade de dados, referente a um aspecto específico do modelo de entrada. Ou seja, os objetos são uma forma de organizar e sistematizar a entrada de dados no EnergyPlus, fazendo com que o arquivo de entrada de dados seja inteligível também aos humanos e não somente aos computadores.

Portanto, um objeto pode habilitar determinado módulo para ser utilizado na simulação e fornecer seus dados de entrada. Ainda, através dos módulos correspondentes, os objetos desempenham tarefas específicas na simulação e geram diversos tipos de saídas, como ações de liga/desliga, cálculos e variáveis referentes aos sistemas que simulam.

Alguns objetos representam os ganhos internos de calor (pessoas, iluminação, equipamentos elétricos, etc.), as características físicas da edificação (materiais e construções de paredes, janelas, portas, etc.) e informações geométricas (posição das paredes, sistemas de coordenadas das zonas térmicas, posição geográfica, etc.). Outros desempenham funções de controle ou inserem as características operacionais do sistema (período de simulação, termostatos, agendas de ocupação e de disponibilidade dos sistemas, etc.). Outros, ainda, representam os equipamentos reais que formam o sistema de condicionamento de ar (ventiladores, dutos, serpentinas de resfriamento e aquecimento, controladores de vazão, chillers, caldeiras, torres de resfriamento, etc.).

A estrutura dos objetos utilizados em EnergyPlus, então, consiste em um bloco de texto com campos separados por vírgulas, nos quais são inseridos os valores do usuário. Primeiramente, um objeto é identificado pelo nome de sua Classe, que é uma palavra chave interna ao programa e não pode ser modificada pelo usuário.

A Classe e indica ao módulo processador de entradas a qual instância, ou módulo da simulação, os dados que virão na sequência deverão ser utilizados. Em seguida, o objeto é identificado por um nome específico, definido pelo usuário, de forma a diferenciar objetos dentro de uma mesma classe.

Dessa forma, algumas Classes são gerais e inserem dados relativos à localidade e à simulação em si, portanto admitem a definição de apenas um objeto no arquivo IDF. Outras Classes, no entanto, são específicas e referem-se a um componente em particular, admitindo quantos objetos forem necessários para a caracterização completa do modelo. Os objetos mostrados na sequência foram gerados pelo editor nativo de arquivos IDF distribuído juntamente com EnergyPlus, o IDF Editor, que posiciona os dados de forma correta dentro dos objetos, agrupa-os por Classes e mantém o texto do arquivo IDF organizado e de fácil compreensão, principalmente devido às tabulações e os comentários gerados.

A Tabela 3.1 mostra o objeto da Classe *Building*, que insere informações gerais e é único no arquivo IDF, enquanto a Tabela 3.2 mostra os objetos da Classe *BuildingSurface:Detailed*, que descreve as superfícies ativas de troca de calor da edificação e, obviamente, cada parede presente deve ter seu objeto da Classe *BuildingSurface:Detailed* correspondente, corretamente definido no arquivo de dados.

Tabela 3.1: Exemplo de entrada de dados para o Objeto *Building*.

Dados Gerais da Edificação	
Building,	! –Classe
Trade Center - Barra Funda,	! –Nome
-0,	! –Eixo Norte {graus}
City,	! –Tipo de Terreno
0.04,	! –Tolerância para convergência de cargas {1}
0,4,	! –Tolerância para convergência de temperatura {deltaC}
FullExteriorWithReflections,	! –Distribuição Solar
25,	! –Número máximo de “Aquecimentos” por dia
;	! –Número mínimo de “Aquecimentos” por dia

Nos demais campos após a Classe e o nome, são inseridos os dados necessários para definir completamente cada objeto. Na Tabela 3.2, por exemplo, observa-se na sequência o tipo de superfície (*Wall*), o tipo de construção (*Parede Externa*, definida pelos objetos da Classe *Construction*, conforme mostrado na Seção 4.2.2), as características externas (*SunExposed*, *WindExposed*, etc.) e as coordenadas dos vértices da parede *PavT_Conv-Par0003*.

Tabela 3.2: Exemplo de entrada para o Objeto BuildingSurface:Detailed.

Dados da Estrutura em Alvenaria	
BuildingSurface:Detailed,	! –Classe
PavT_Conv-Par0003,	! –Nome
Wall,	! –Tipo de superfície
Parede Externa,	! –Nome da construção
PavT_Convivencia,	! –Nome da zona
Outdoors,	! –Condições na superfície oposta da superfície
,	! –Objeto com as condições na superfície oposta da superfície
SunExposed,	! –Exposição ao sol
WindExposed,	! –Exposição ao vento
Autocalculate,	! –Fator de visão para o solo
4,	! –Número de vértices
-8.284,	! –Coordenada x do vértice 1
-12.908,	! –Coordenada y do vértice 1
2.400,	! –Coordenada z do vértice 1
-8.283,	! –Coordenada x do vértice 2
-12.908,	! –Coordenada y do vértice 2
0.000,	! –Coordenada z do vértice 2
2.312,	! –Coordenada x do vértice 3
-2.312,	! –Coordenada y do vértice 3
0.000,	! –Coordenada z do vértice 3
2.312,	! –Coordenada x do vértice 4
-2.312,	! –Coordenada y do vértice 4
2.400;	! –Coordenada z do vértice 4

Da Tabela 3.1 e da Tabela 3.2, ainda se observa que dentro de um objeto, mesmo que um campo seja opcional, a vírgula que representa esse campo deve ser incluída a menos que seja o último campo no objeto, onde se usa o ponto-e-vírgula (;). Ou seja, a estrutura do objeto e a ordem dos campos são predeterminadas e devem sempre ser respeitadas pelo usuário, para cada Classe de objeto.

E finalmente, o sinal de exclamação (!) indica os comentários inseridos pelo usuário e todos os caracteres que o seguem são ignorados pelo processador de entradas. Portanto, tabulações, espaços e comentários são insignificantes para o processador de entradas e o objeto *Building* também pode ser inserido como mostrado na Tabela 3.3. Observa-se que o último campo (Número mínimo de “Aquecimentos” por dia), apesar de estar em branco, continua presente no objeto. Apenas para esclarecer, os Aquecimentos são os momentos iniciais do processo de simulação, onde ocorre o aquecimento transiente da envoltória, de forma a não causar distorções nos resultados dos primeiros dias da simulação propriamente dita.

Tabela 3.3: Exemplo de entrada direta de dados para o Objeto Building.

Ocupação nos Escritórios
Building,Trade Center-Barra Funda,-0,City,0.04,0.4,FullExteriorWithReflections,25,;

3.4 Arquivo de Entrada de Dados

O Arquivo de Entrada de Dados, ou *Input Data File*, é um arquivo de texto no formato ASCII com a extensão IDF. Conforme dito anteriormente, o arquivo de dados é o primeiro modelo de entrada no EnergyPlus e contém todos os objetos que definem os aspectos físicos da edificação, como dados da envoltória, dos ocupantes, dos equipamentos elétricos, dos sistemas de condicionamento de ar, das características de uso do empreendimento, etc. De forma geral, então, o arquivo IDF é uma coleção de objetos definidos pelo usuário, que descrevem o modelo que se deseja simular. Assim, todos os objetos a serem utilizados na simulação devem ser definidos com seus dados de entrada, de forma apropriada no arquivo texto IDF para que a simulação tenha êxito.

A grande implicação da estrutura modular de processamento e aquisição de dados do EnergyPlus, conforme explicado na Seção 3.2, é que qualquer objeto pode ser definido em qualquer parte do arquivo IDF, sem uma ordem predefinida. Ou seja, ao contrário dos objetos, o arquivo IDF não possui uma estrutura rígida que deve ser respeitada pelo usuário quando da inserção dos dados do modelo. Dessa forma, o usuário fica completamente livre para definir seus objetos na ordem em que melhor lhe aprouver.

Porém, mesmo com essa liberdade, definir corretamente todo o arquivo IDF através da edição direta do texto, em um processador de texto qualquer, não é uma tarefa fácil, mesmo para os mais avançados usuários. E conforme foi dito anteriormente, os objetos e o arquivo IDF constituem-se na interface entre o usuário e os módulos de processamento e simulação do EnergyPlus.

Para facilitar tarefa de modelagem, o EnergyPlus é distribuído com um editor de arquivos IDF, o IDF Editor, que a partir das entradas inseridas pelo usuário, posiciona os dados de forma correta dentro dos objetos e gera o arquivo IDF. Assim, o IDF Editor é uma interface gráfica simplificada para a edição dos objetos e do arquivo IDF.

A Tabela 3.4 mostra um exemplo de arquivo IDF gerado pelo IDF Editor. Para facilitar o entendimento e deixar o arquivo organizado, o IDF Editor tem a opção de manter os objetos de uma mesma Classe em sequência no texto do arquivo, conforme se observa do comentário *!-Option SortedOrder* e dos dois últimos objetos do tipo *Output:Variable*, que aparecem agrupados.

Tabela 3.4: Arquivo de entrada de dados gerado pelo IDF Editor.

Estrutura do Arquivo IDF

```

!-Generator IDFEditor 1.44
!-Option SortedOrder
!-NOTE: All comments with '!-' are ignored by the IDFEditor and are generated
automatically.
!-Use '!' comments if they need to be retained when using the IDFEditor.
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: VERSION =====
Version,
    8.0;                                !- Version Identifier
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SIMULATIONCONTROL =====
SimulationControl,
    Yes,                                  !- Do Zone Sizing Calculation
    Yes,                                  !- Do System Sizing Calculation
    No,                                    !- Do Plant Sizing Calculation
    Yes,                                  !- Run Simulation for Sizing Periods
    Yes;                                  !- Run Simulation for Weather File Run
                                           !- Periods
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONEAIRCONTAMINANTBALANCE =====
ZoneAirContaminantBalance,
    Yes,                                  !- Carbon Dioxide Concentration
    Concentracao Externa de CO2,         !- Outdoor Carbon Dioxide Schedule Name
    No;                                    !- Generic Contaminant Concentration
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: TIMESTEP =====
Timestep,
    6;                                    !- Number of Timesteps per Hour
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SITE:LOCATION =====
Site:Location,
    Sao Paulo - Barra Funda,             !- Name
    -23.627,                             !- Latitude {deg}
    -46.65,                               !- Longitude {deg}
    -3.0,                                 !- Time Zone {hr}
    802;                                  !- Elevation {m}
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:VARIABLE =====
Output:Variable,
    *,                                    !- Key Value
    Zone Air Temperature,                !- Variable Name
    Hourly;                              !- Reporting Frequency
Output:Variable,
    *,                                    !- Key Value
    Zone Air CO2 Concentration,          !- Variable Name
    Hourly;                              !- Reporting Frequency

```

Devido às particularidades de todos os aspectos considerados em uma simulação termoenergética, cada classe de objetos exige critérios diferenciados para correta definição. E de forma a tornar o processo de edição do arquivo IDF mais prático, para uso no dia-a-dia, métodos diferentes para a entrada de dados deverão ser utilizados de acordo com a natureza de cada objeto. Durante este trabalho, foram buscadas diversas soluções alternativas para tornar a modelagem mais rápida e fácil e as que se mostraram mais efetivas foram utilizadas com êxito e serão descritas no Capítulo 4.

3.5 Arquivos Climáticos

Conforme mostrado na Seção 3.1, o segundo modelo de entrada no EnergyPlus é o arquivo climático, que se constitui no modelo climatológico para a localidade em questão.

Segundo Forejt et al. (2006), atualmente existem vários conjuntos de dados climáticos disponíveis para a simulação termoenergética de edifícios. Porém, os autores frisam que eles podem ser significativamente diferentes e, portanto, devem ser cuidadosamente selecionados antes da sua utilização. Ressaltam que mesmo com uma grande quantidade de bancos de dados disponíveis, há falta de acesso a dados apropriados fora dos EUA, Europa Ocidental e Japão, e em regiões em que as simulações computacionais não são tipicamente utilizadas (ou seja, os países em desenvolvimento). Dessa forma, fazem uma revisão dos arquivos de dados meteorológicos acessíveis e sugere quais devem ser usados para o projeto e análise de desempenho de longo prazo de sistemas climatização, em localizações geográficas não-típicas em todo o mundo.

Segundo Hensen (1999), estimativas precisas do desempenho energético de edificações requerem o conhecimento detalhado do clima para a localidade em questão. Para a simulação termoenergética em EnergyPlus, por exemplo, é necessário a definição de um arquivo climático que contenha as variáveis necessárias para cálculo dos ganhos de calor por condução, convecção e radiação devido à incidência solar sobre as paredes da edificação e outras variáveis ambientais. Para uma simulação anual, o arquivo climático deve conter uma série completa de dados das variáveis necessárias, para as 8.760 horas de um ano meteorológico. Estas incluem normalmente, temperatura do ar, radiação solar, umidade, velocidade e direção do vento.

Em alguns casos mais aprofundados, existe ainda a necessidade de dados adicionais como luminância do céu, temperatura radiante do céu, informações sobre cobertura de neve e concentração de gases (NO_x, CO, CO₂, O₃), pólen, etc. No EnergyPlus, o arquivo climático é identificado pela extensão EPW, e constitui-se no modelo climatológico da localidade onde a edificação em estudo se localiza.

Segundo Bhandari et al. (2012), existem três classes principais de dados meteorológicos com casos tradicionais de uso para cada um. Os dados meteorológicos típicos representam o clima de algum local durante um período de tempo arbitrário e são muitas vezes utilizados para simulações de condições de projeto e desempenho energético ao longo da vida útil de edificações. Os dados meteorológicos reais são as variáveis medidas em estações climáticas de um local específico para um determinado período de tempo e são utilizados para a calibração e validação de simulações por meio das contas de energia. E os dados meteorológicos futuros, utilizados para controle adaptativo de uma construção.

Para cada uma destas classes os autores frisam que há, no mundo todo, uma infinidade de conjuntos de dados meteorológicos representativos, provenientes de diversas fontes diferentes. Dentre as bases de dados que contém séries reais, podem ser citadas o *National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA* (2012) e o *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)* do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – UNEP (2012). No Brasil, pode ser citado o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2012). Para dados futuros, merecem destaque o National Climatic Data Center.

Desta forma, portanto, a série de dados a ser selecionada para determinado estudo dependerá dos objetivos da simulação a ser executada. No caso deste trabalho, onde serão avaliados os impactos de diferentes sistemas de condicionamento de ar no consumo energético de uma edificação, o modelo climatológico a ser inserido no EnergyPlus deverá ser composto por dados típicos para a localidade em questão, no caso a cidade de São Paulo. Porém, as séries de dados meteorológicos típicos, são obtidas a partir de tratamentos estatísticos aplicados sobre os dados reais da localidade. Assim, dentro da classe de dados climáticos típicos, ainda existem diversos tipos de séries de dados obtidos a partir de métodos estatísticos diferentes.

Basicamente, estas séries de dados climáticos típicos diferem entre si quanto ao fuso horário e formato de tempo, unidades, variáveis e, principalmente, quanto ao método estatístico utilizado para tratamento dos dados.

Quanto às unidades e variáveis, os arquivos podem ser intercambiáveis entre si através de programas de conversão distribuídos pelos próprios editores da série de dados. Porém, quanto ao método estatístico, o analista deve escolher com critério a série mais adequada à sua necessidade.

Em diversas bases de dados na internet, vários tipos de arquivos de dados climáticos típicos para simulação energética podem ser encontrados. Esta disponibilidade, porém, acaba por confundir os profissionais de simulação e análise de eficiência energética em edificações, deixando-os sem saber qual tipo usar. Somente o site oficial do EnergyPlus, US-DOE (2014b), lista 22 fontes de dados para arquivos climáticos de diferentes países. E dentre os formatos de séries de dados encontrados nestas e outras fontes, estão TRY, IWEC, TMY, SWERA, CTZ2, CWEC, CSV, etc., além dos formatos de outros algoritmos de simulação energética como ESP-r, DOE-2 e BLAST.

Dentre os formatos citados, e no mérito do método estatístico utilizado, três se destacam: o Ano Climático de Referência – TRY (*Tested Reference Year*), o Ano Meteorológico Típico – TMY (*Typical Meteorological Year*) e o Clima Internacional para Cálculo de Energia – IWEC (*International Weather for Energy Calculations*). Em seguida, são dados maiores detalhes para estes formatos.

3.5.1 Ano Climático de Referência

O Ano Climático de Referência (TRY), cuja metodologia de obtenção foi apresentada em Stamper (1977), é definido a partir de um conjunto de dados climáticos reais de 25 anos, com a eliminação sucessiva de anos com temperaturas de bulbo seco extremas e atípicas. Para o hemisfério sul, inicia-se com a eliminação do ano com janeiro mais quente, em seguida elimina-se o ano com julho mais frio e, assim sucessivamente, até que dos 25 anos iniciais reste apenas um considerado típico, denominado TRY. Segundo o autor, o TRY pode ser usado para comparar diferentes sistemas de condicionamento de ar em uma mesma edificação, simulações de alteração na orientação de fachadas ou operações de retrofit.

Porém, ainda segundo Stamper (1977), o TRY não é uma amostra suficientemente representativa do clima local, e não pode ser utilizado em simulações de longo prazo e em cálculos de consumo anual de energia em edificações. Outra limitação das séries TRY é a ausência de dados diretos de radiação solar, que devem ser estimados ou calculados a partir das

informações sobre cobertura de nuvens. Portanto, caso só se disponha de arquivos TRY para a localidade da edificação em estudo, a simulação poderá ser feita tendo em mente que os resultados de consumo de energia são apenas estimativos.

No Brasil, Goulart et al. (1998) analisaram os dados climáticos de 14 cidades brasileiras, em um trabalho inédito no país. Os parâmetros de projeto para sistemas de condicionamento de ar, como temperatura de projeto ASHRAE, graus dia / graus hora, temperatura BIM e dia típico de projeto, foram obtidos para as cidades selecionadas seguindo a metodologia apresentada na edição de 1985 de ASHRAE (2009).

Além disso, os autores elaboraram os arquivos TRY e levantaram as cartas bioclimáticas das localidades. Os arquivos TRY elaborados neste trabalho podem ser encontrados, com dados atualizados e nos formatos EnergyPlus, ESP-r e DOE-2.1E, pelo site do Laboratório de Eficiência Energética de Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina, LabEEE (2012).

Até então, dados deste tipo eram escassos e de baixa qualidade no país e, quando da elaboração do trabalho de Goulart et al. (1998), em alguns casos o TRY foi obtido de uma série menor que a de 25 anos recomendada por Stamper (1977). Neste caso, simulações usando arquivos TRY devem ser feitas com ainda mais cautela. Em outro trabalho brasileiro sobre o tema, Pereira et al. (2004) apresenta passo-a-passo a metodologia de obtenção do TRY para a cidade de Belo Horizonte – MG.

3.5.2 Ano Meteorológico Típico

O Ano Meteorológico (TMY) Típico, foi criado no *Sandia National Laboratories* dos Estados Unidos, por Hall et al. (1978), e consiste em um algoritmo mais complexo que o utilizado para a obtenção do TRY pois não se baseia somente na temperatura de bulbo seco. Atualmente, para localidades nos Estados Unidos, o TMY é elaborado pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), conforme Wilcox e Marion (2008), e passou por duas atualizações recentemente. O TMY2 foi lançado em 1994 e o TMY3, em 2008.

Segundo os autores da última atualização, o método de Hall et al. (1978) para o TMY é uma abordagem empírica que seleciona meses individuais de diferentes anos que ocorrem no período de registro. Por exemplo, no caso uma série de 30 anos de dados, todos os 30 janeiros são examinados, e aquele julgado mais típico pelo algoritmo é incluído no TMY. Os outros

meses do ano são tratados de maneira semelhante, e em seguida os 12 meses selecionados são ordenados para formar um ano típico completo.

Para a escolha dos meses típicos são considerados cinco elementos: radiação horizontal global, radiação normal direta, temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho e velocidade do vento. Estes elementos são considerados os mais importantes para simulação de sistemas de conversão de energia solar e edificações. Dessa forma, como o algoritmo atribui maior prioridade para os elementos de radiação solar, os meses selecionados podem não ser típicos para os outros elementos.

A grande vantagem do algoritmo é que a média dos elementos julgados, nos meses selecionados, se aproxima das médias de longo prazo destes mesmos elementos, em todo o período amostrado, fazendo com que o ano formado por estes meses seja altamente significativo. Contrariamente ao TRY, o TMY pode ser utilizado em simulações de longo prazo e em cálculos de consumo anual de energia para edificações. Como restrição, porém, o TMY não pode ser utilizado para dimensionamento de sistemas de condicionamento de ar, pois assim como o TRY, não contém dados extremos de temperatura, utilizados para inserir a pior condição possível no período de dimensionamentos (objeto Classe *SizingPeriod:DesignDay*) da simulação em EnergyPlus.

Para localidades brasileira, Roriz (2012) apresentou arquivos climáticos TMY, já em formato EPW do EnergyPlus, para 411 estações meteorológicas espalhadas pelo Brasil. Esta coletânea de arquivos climáticos pode ser obtida, também, em LabEEE (2012). O projeto faz parte da proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático do Brasil, no âmbito da norma ABNT NBR 15.220:2005 (ABNT, 2005). Devido a amplitude de amostras climáticas analisadas e da quantidade de localidades para os quais foram criados os arquivos EPW, o trabalho constituiu-se em uma ferramenta de grande valia para pesquisadores e projetistas de sistemas de climatização em todo o Brasil.

3.5.3 Clima Internacional para Cálculo de Energia

O Clima Internacional para Cálculo de Energia (IWEC) é o formato de dados climáticos para localidades internacionais, criado por Thevenard e Brunger (2002) e apresentado em ASHRAE (2012), para simulações computacionais anuais. Segundo os autores, o método Kasten utilizado na obtenção do IWEC se assemelha à metodologia de seleção de

meses do TMY, porém atribui pesos diferentes para cada fator climático. Tais pesos podem variar de 2,5 a 4,0 para temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho, velocidade do vento, direção do vento e radiação solar, fazendo com que, nos arquivos IWEC, a TBS média e a radiação solar cheguem a responder por 70 % do índice composto mensal.

De forma semelhante ao TMY, o IWEC pode ser utilizado em simulações de longo prazo e em cálculos de consumo anual de energia para edificações. Ainda como o TMY, IWEC não pode ser utilizado para dimensionamento de sistemas de condicionamento de ar, pois também não contém dados extremos de temperatura para o período de dimensionamento dos sistemas no EnergyPlus. A versão 2.0 do formato foi publicada em DVD em ASHRAE (2012) para 3.012 localidades fora dos Estados Unidos e Canadá.

No Brasil, Carlo (2005) comparou o método Kasten de obtenção de arquivos IWEC com um método desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, quanto à radiação solar, para cinco cidades brasileiras. Concluíram que o método da UFSC, chamado método LabEEE, apresentava menores distorções em relação aos dados de radiação solar de referência. A partir daí, aplicando correções e ajustes aos modelos utilizados e desenvolveram arquivos climáticos IWEC para 14 capitais brasileiras: Belém, São Luís, Fortaleza, Recife, Natal, Maceió, Salvador, Vitória, Rio de Janeiro, Brasília, São Paulo, Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre. Tais arquivos podem ser obtidos em LabEEE (2012).

Deve-se cuidar para não confundir as séries IWEC (*International Weather for Energy Calculations*), com arquivos WYEC (*Weather Years for Energy Calculations*). Os arquivos WYEC surgiram em 1980 como uma continuidade do TRY, porém com dados de radiação solar.

Para os propósitos deste trabalho, podem ser utilizados tanto arquivos TMY como IWEC. No entanto, ao baixar arquivos climáticos de bases de dados na Internet, deve-se ter certeza que foram realmente gerados por um dos dois métodos, pois, em geral, os arquivos IPW disponíveis podem ter sido gerados por quaisquer dos métodos estatísticos apresentados anteriormente e o formato mais comum encontrado nestas bases de dados é o TRY.

Neste trabalho, optou-se pela adoção dos arquivos IWEC devido à sua metodologia de obtenção, que atribui maior peso às variáveis de maior relevância em simulações (radiação solar, temperatura de bulbo seco, etc.), como a realizada neste trabalho. Além disso, a amostra de dados a partir da qual os arquivos IWEC foram elaborados, é consideravelmente mais recente que a utilizada nos arquivos SWERA, por exemplo.

CAPÍTULO 4

4. Metodologia

A correta definição do Arquivo de Entrada de Dados (IDF) foi uma parte substancial do desenvolvimento deste trabalho e exigiu metodologias específicas para cada instância do modelo, devido às particularidades inerentes a cada uma. Assim, vários programas de computador e diversas fontes de dados foram utilizados para este fim. De modo a facilitar compreensão da metodologia desenvolvida aqui, na Seção 4.8 é apresentado um fluxograma com as principais etapas da modelagem, com indicação da fonte dos dados utilizados e o programa correspondente à modelagem de cada uma dessas instâncias.

Para a modelagem da envoltória, por exemplo, a edição do arquivo IDF através do IDF Editor exige a entrada manual dos vértices de cada uma das paredes, portas, janelas, claraboias e dispositivos de sombreamento do edifício, com relação ao sistema de coordenadas definido. Como a edificação em estudo é bastante complexa, conforme mostra a Seção 4.1, a modelagem pelo IDF Editor torna-se impraticável, devido ao longo tempo necessário para essa tarefa.

Além disso, o modo manual de entrada das coordenadas dos vértices das superfícies da edificação, por se tratar de estruturas tridimensionais, fatalmente poderia levar a erros geométricos. Consequentemente, erros geométricos podem causar erros físicos e imprecisão nos resultados, pois em vários casos, a taxa de transferência de calor depende diretamente das dimensões e das condições ambientais em ambos os lados de uma parede.

Portanto, o IDF Editor deve ser evitado, a menos que o caso em estudo seja consideravelmente simples, fazendo com que outras soluções para a modelagem matemática da estrutura física seja necessária. Conforme mostrado na Seção 2.5, várias aplicações baseadas em CAD-3D foram desenvolvidas para este fim. Dessa forma, buscando agilizar e aprimorar a entrada de dados para as superfícies ativas de troca de calor, o próprio Departamento de Energia dos EUA, desenvolvedor do EnergyPlus, lançou um complemento para SketchUp, a ferramenta de CAD-3D do Google.

O complemento, chamado OpenStudio e apresentado na Seção 2.5.8, gera o arquivo de entrada de dados para simulação em EnergyPlus, a partir do desenho 3D do edifício. Como todo software CAD, o SketchUp gera um modelo matemático conforme o usuário define entidades geométricas através dos dispositivos de entrada do computador. Assim, com a ferramenta linha do SketchUp, o usuário desenha as arestas que formam determinada entidade e, quando o programa identifica uma forma geométrica fechada como um retângulo, automaticamente essa forma é convertida em uma superfície com a cor branca (padrão do SketchUp). Posteriormente, o usuário pode pintar suas superfícies com as mais diversas cores e texturas, que representam materiais reais, como transparências, brilhos e outros detalhes visuais de elementos arquitetônicos.

Porém, todos esses recursos gráficos são puramente estéticos, tornando o SketchUp uma excelente ferramenta para o desenvolvimento de maquetes eletrônicas onde os modelos gerados são, na verdade, um conjunto de elementos puramente matemáticos em um espaço tridimensional. Com o OpenStudio, o modelo matemático gerado pelo SketchUp é convertido automaticamente no modelo termofísico de entrada de dados no EnergyPlus, o arquivo IDF.

Utilizando-se o OpenStudio, quando o SketchUp identifica uma forma geométrica fechada, automaticamente o complemento gera um objeto *BuildingSurface:Detailed*, e define todos os seus dados de entrada. Neste caso, ao invés das cores padrão do SketchUp, o OpenStudio utiliza o mesmo esquema de cores do VisualDOE, interface gráfica do DOE-2 apresentado na Seção 2.5.4, à saber: amarelo escuro para paredes externas, vermelho para telhados, cinza escuro para pisos, marrom para portas de madeira, etc.

BuildingSurface:Detailed, é a Classe de objetos no qual são definidas as características geométricas e físicas dos elementos construtivos (superfície ativa de troca de calor) no EnergyPlus, e que é utilizado como entrada de dados para os módulos de balanço energético nos ambientes. Dessa forma, o OpenStudio automatiza a definição da envoltória e minimiza a possibilidade de erros. Essa automação é permitida por uma biblioteca de dados construtivos, também com a extensão IDF, denominado por *OpenStudio Template* em inglês, cujas configurações são utilizadas como padrão para as novas entidades desenhadas no SketchUp.

Esta biblioteca, além dos dados de materiais construtivos e construções, pode conter ainda dados para dimensionamento dos sistemas como (objeto da Classe *SizingPeriod:DesignDay*), características médias de ocupação para vários tipos de uso de ambientes (como número de pessoas por m² para escritórios, nos objetos da Classe *People*), agendamento de ocupação e atividade (Classe *Schedules:Compact*), taxas de iluminação

(*Lights*), distribuição de cargas de equipamentos (*ElectricEquipment*), infiltração (*Zone Infiltration:DesignFlowRate*), ventilação (*ZoneVentilation:DesignFlowRate*), etc. Neste trabalho, a biblioteca de dados foi usada basicamente para permitir que o OpenStudio aplique automaticamente os materiais de construção nas superfícies desenhadas no SketchUp, pois os demais dados de entrada foram definidos manualmente pelo IDF Editor

Porém, a biblioteca original do OpenStudio traz apenas componentes construtivos comumente utilizados em seu país de origem e não reflete a realidade que se deseja avaliar aqui no Brasil. Portanto, para utilizar todo potencial do OpenStudio neste trabalho, antes da modelagem da envoltória deve-se definir uma nova biblioteca, com materiais e tipos de construções utilizados no Brasil, conforme mostrado na Seção 4.2.

Apesar de toda a facilidade na modelagem da envoltória permitida pelo OpenStudio, ainda serão necessárias outras formas de edição do arquivo IDF, pois o complemento ainda não cobre todos os tipos de objetos necessários para uma simulação em EnergyPlus. Por exemplo, o OpenStudio ainda não permite a inclusão de sistemas de condicionamento de ar complexos e outras funcionalidades que serão avaliadas neste trabalho.

Por conveniência, então, a definição dos demais sistemas e parâmetros de simulação serão efetuados de forma combinada entre o IDF Editor e o Bloco de Notas do Windows, para edição direta do arquivo de dados IDF. Nas próximas seções serão mostradas detalhadamente os passos para o desenvolvimento do modelo físico do EnergyPlus (arquivo IDF), e sua posterior simulação.

4.1 Características da Edificação

O objeto de estudo deste trabalho é uma edificação comercial localizada na cidade de São Paulo, mais precisamente no bairro Barra Funda, zona oeste da capital paulista. O conceito arquitetônico do empreendimento utiliza ampla área envidraçada nas fachadas, com janelas constituídas de vidro simples e caixilhos de alumínio. As paredes são revestidas com argamassa de reboco em ambos os lados, sendo as paredes externas construídas com tijolo cerâmico vazado com 8 furos e 20 cm e as paredes internas de tijolo cerâmico vazado com 8 furos e 10 cm. As lajes são de concreto com revestimento cerâmico na parte superior, o térreo possui contrapiso de concreto com revestimento cerâmico e o telhado é constituído por laje de concreto

revestida com argamassa de reboco na parte inferior, câmara de ar na parte superior e telhas de fibrocimento. Todos os ambientes internos possuem forro de gesso. Para a simulação em EnergyPlus, as metodologias utilizadas para definição dos objetos das Classes *Material* e *Construction* são apresentadas nas Seções 4.2.1 e 4.2.2.

No Pavimento Térreo, o edifício conta com a Recepção, o Corredor de acesso aos elevadores, duas Salas utilizadas pela administração do condomínio e um Centro de Convivências. Todos os ambientes são climatizados. As características de ocupação, as intensidades de iluminação e equipamentos elétricos, bem como as áreas dos ambientes do Pavimento Térreo são apresentadas na Tabela 4.1. Em seguida, a Figura 4.1 mostra a planta baixa do Térreo, com a distribuição dos ambientes. A definição dos objetos das Classes *People*, *Lights* e *ElectricEquipment*, referentes às cargas da Tabela 4.1, são mostrados na Seção 4.4.

Tabela 4.1: Ocupação máxima e cargas internas para o Pavimento Térreo.

Ambiente	Área [m²]	Ocupação [pessoas]	Iluminação [W/m²]	Equipamentos [W/m²]
Corredor	39,60	13	8	5
Recepção	124,83	18	10	5
Sala 1	21,80	5	8	5
Sala 2	21,91	5	8	5
Convivência	172,94	100	12	5

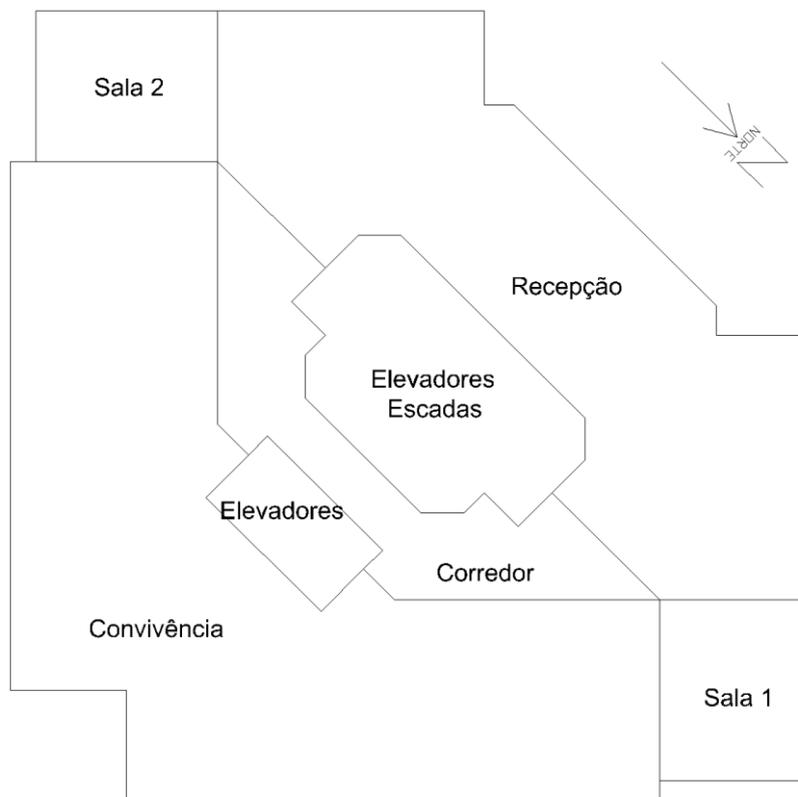


Figura 4.1: Planta do Pavimento Térreo.

Quanto ao Pavimento 1, toda sua área é ocupada por uma única empresa, com projeto arquitetônico feito sob medida. A empresa conta com o Corredor de acesso, a Recepção, um Auditório para 55 pessoas, uma Sala de Reuniões para 16 pessoas, a Engenharia, a sala de TI, a Gerência e a Manutenção. Neste Pavimento 1, apenas o corredor não é climatizado. As cargas internas para estes ambientes são mostradas na Tabela 4.2, enquanto que na Figura 4.2, pode-se observar a disposição de cada um desses ambientes na planta baixa do Pavimento 1 e, na Figura 4.3 pode-se observar o Layout de todo o escritório.

Tabela 4.2: Ocupação máxima e cargas internas para o Pavimento 1.

Ambiente	Área [m²]	Ocupação [pessoas]	Iluminação [W/m²]	Equipamentos [W/m²]
Recepção	49,94	7	10	10,7
Reunião	30,38	16	16	10,7
Auditório	44,52	55	16	10,7
Engenharia	172,94	28	16	10,7
TI	21,91	7	25	80,0
Gerência	9,62	3	16	10,7
Manutenção	5,40	2	3	10,7

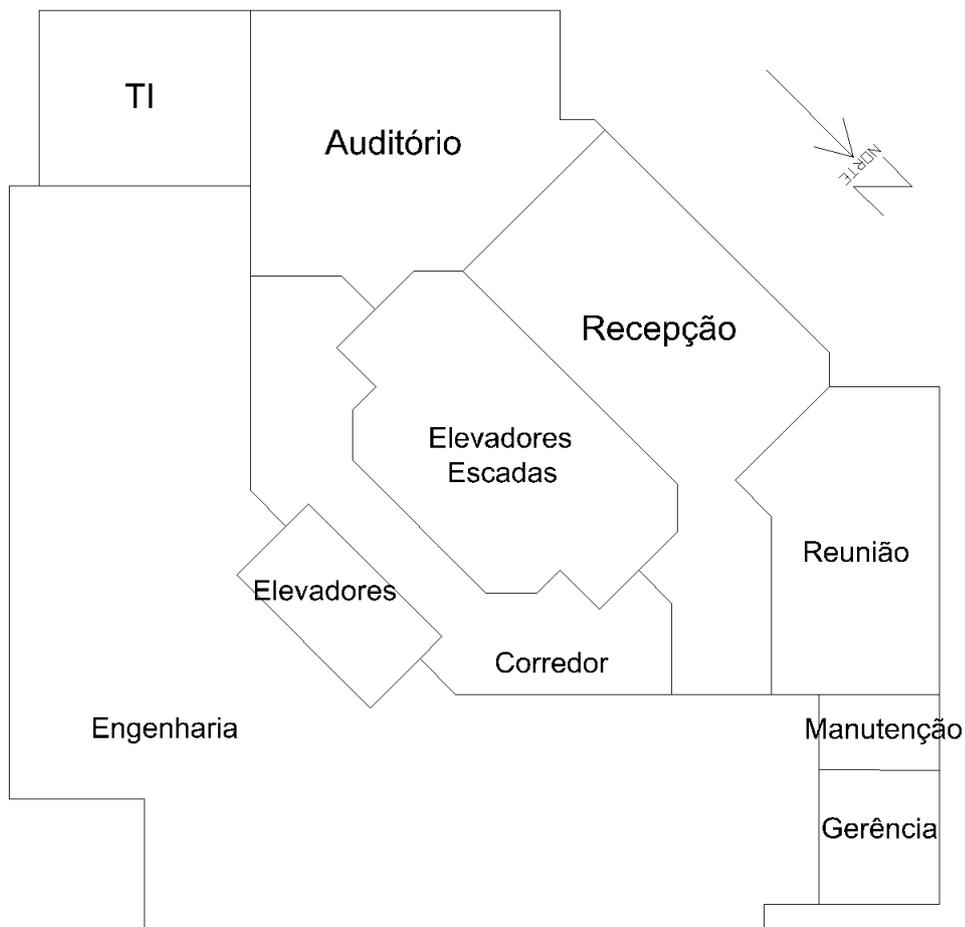


Figura 4.2: Planta do Pavimento 1.

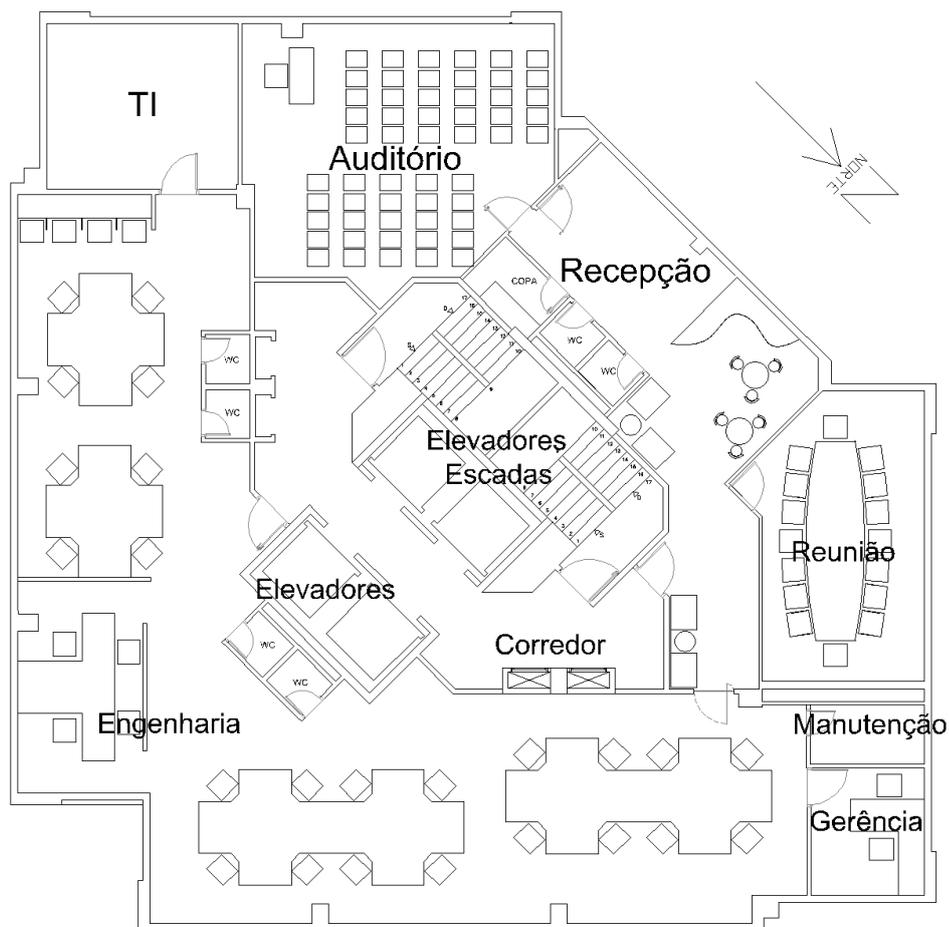


Figura 4.3: Layout do Pavimento 1.

Quanto ao Pavimento 2, a distribuição dos ambientes é um pouco diferente, com duas empresas ocupando o lado Norte, nos Blocos 1 e 2, sendo que o Bloco 2 possui os ambientes Recepção, Reunião e Operacional. Já o lado Sul, é ocupado por salas comerciais, identificadas como Bloco 3 a 6. Assim como o Pavimento 1, somente o Corredor de acesso aos elevadores e escadas não é climatizado. Em seguida, a Tabela 4.3 mostra as características de ocupação dos ambientes do Pavimento 2, enquanto a Figura 4.4 mostra sua planta baixa.

Tabela 4.3: Ocupação máxima e cargas internas para o Pavimento 2.

Ambiente	Área [m ²]	Ocupação [pessoas]	Iluminação [W/m ²]	Equipamentos [W/m ²]
Bloco 1	86,65	16	16	10,7
Bloco 2 - Recepção	14,38	3	16	10,7
Bloco 2 - Reunião	15,56	8	16	10,7
Bloco 2 - Operacional	56,61	10	16	10,7
Bloco 3	56,78	11	16	10,7
Bloco 4	29,62	6	16	10,7
Bloco 5	33,87	6	16	10,7
Bloco 6	52,91	9	16	10,7

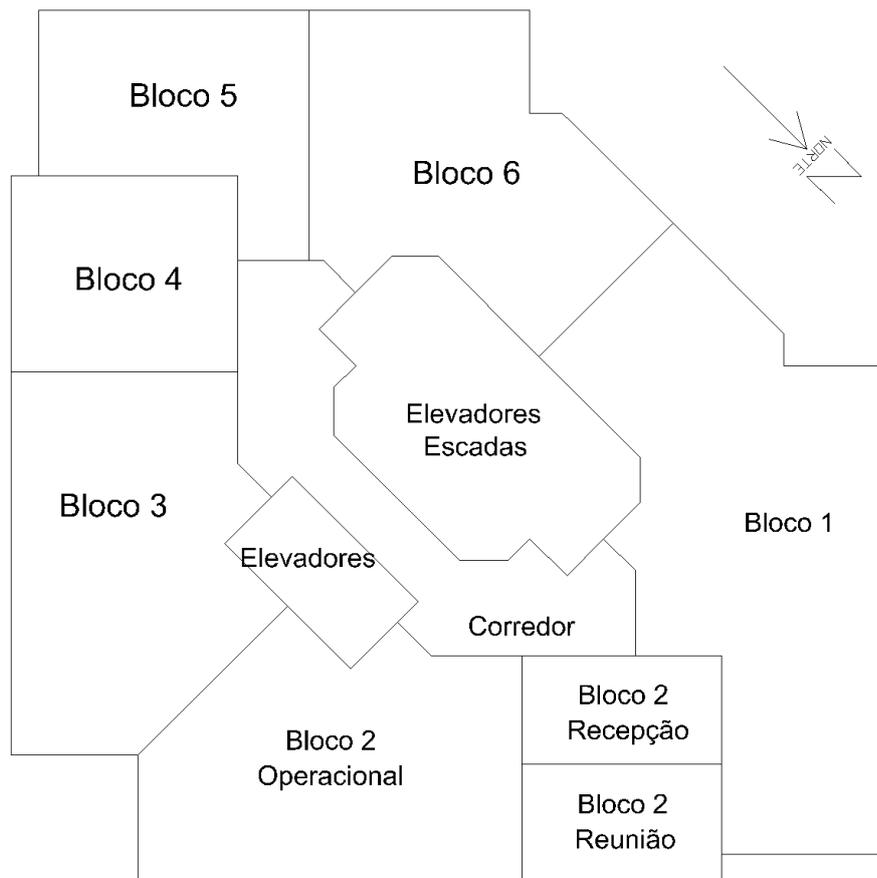


Figura 4.4: Planta do Pavimento 2.

Finalmente, no Pavimento 3, que tem uma área útil menor que a dos demais pavimentos, existem mais duas salas comerciais, chamadas Cobertura 1 e Cobertura 2, sendo ambas condicionadas. A Tabela 4.4 mostra suas características de ocupação.

Tabela 4.4: Ocupação máxima e cargas internas para o Pavimento 3.

Ambiente	Área [m²]	Ocupação [pessoas]	Iluminação [W/m²]	Equipamentos [W/m²]
Cobertura 1	46,76	10	16	10,7
Cobertura 2	46,56	10	16	10,7

Assim, a Figura 4.5 e a Figura 4.6 mostram a aparência final do Edifício modelado em SketchUp, através do complemento OpenStudio. Nas próximas seções, serão mostrados os passos e metodologias utilizadas neste trabalho, para a modelagem de cada detalhe relevante a uma simulação termoenergética, para a edificação apresentada aqui.

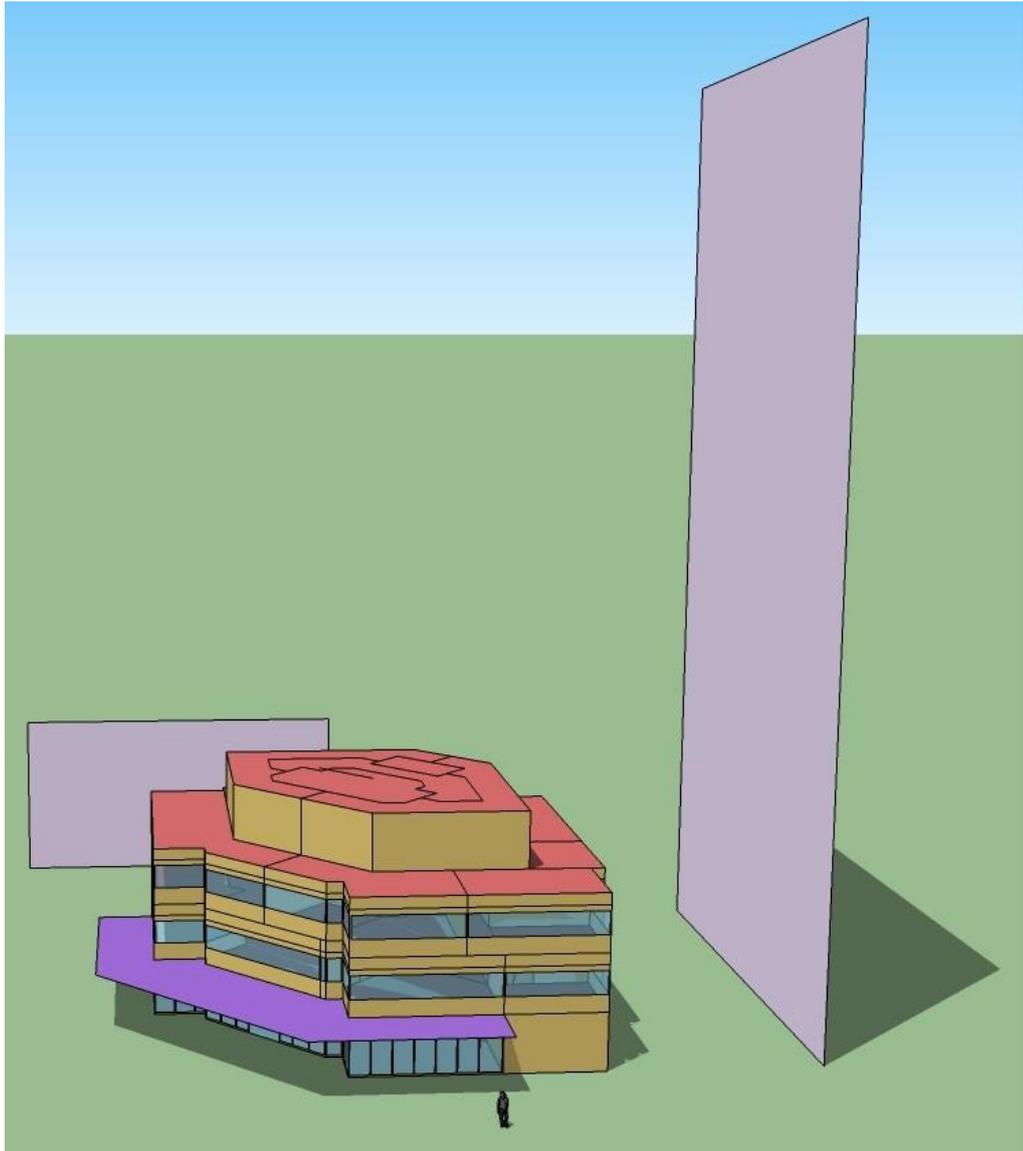


Figura 4.5: Vista geral do empreendimento.

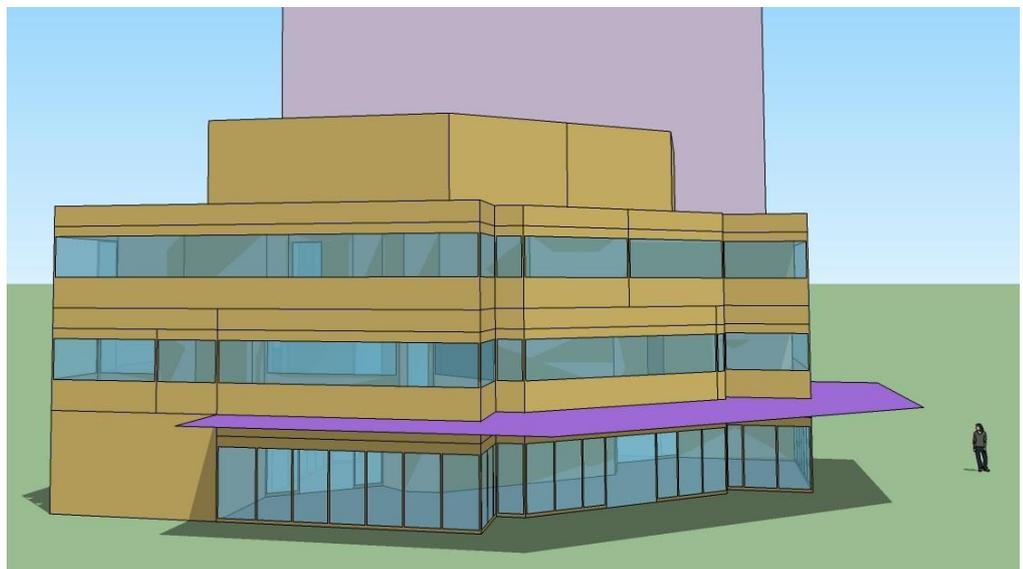


Figura 4.6: Vista lateral do empreendimento.

4.2 Biblioteca de Dados Construtivos

A primeira etapa da definição do modelo termoenergético de entrada do EnergyPlus com auxílio do Google SketchUp e seu plug-in OpenStudio, é definir a biblioteca padrão com materiais de uso corrente no Brasil, e substituir o arquivo fornecido originalmente com o OpenStudio, que traz apenas materiais de construção utilizados em outras regiões.

Primeiramente, deve-se definir corretamente os materiais de construção utilizando os objetos da classe *Material*, com todas as propriedades de entrada exigida por este objeto, como massa específica, calor específico, resistência térmica, emissividade da superfície, cor, etc. Além dos materiais, a biblioteca deve conter as construções, pelos objetos da Classe *Construction*, que serão referenciadas nos objetos *BuildingSurface:Detailed*, gerados pelo OpenStudio. No EnergyPlus, uma construção consiste em várias camadas de materiais e é definida pelos objetos da Classe *Construction*. As definições dos objetos *Material* e *Construction* foram feitas pelo IDF Editor e será mostrada com detalhes nas próximas seções.

4.2.1 Materiais

Ordenes et al. (2003) definiram uma completa biblioteca de materiais para uso em VisualDOE 3.1, a partir de uma metodologia de cálculo do coeficiente global de transmissão de calor para paredes de tijolos furados (ou vazados), e outros tipos de construções de uso corrente no Brasil. Como o DOE faz parte do algoritmo de simulação do EnergyPlus, os dados de entrada do objeto *Material* são praticamente os mesmos apresentados em Ordenes et al. (2003). Dessa forma, seu trabalho será usado como base para definição da biblioteca de materiais utilizada neste trabalho.

Segundo Ordenes et al. (2003), o processo de cálculo de propriedades dos elementos construtivos seguiu a metodologia proposta pela norma de desempenho térmico de edificações ABNT NBR 15.220-2:2005 (ABNT, 2005c), que na época de seu trabalho estava em fase de projeto de norma. Os autores ressaltaram que o método definido pelo VisualDOE para inserir os componentes construtivos apresenta certas limitações para desenvolver modelos de materiais e construções, com relação à ABNT (2005c).

Neste sentido, a principal dificuldade é que o programa considera todos os componentes formados por camadas transversais ao fluxo de calor, não permitindo o cálculo de resistências térmicas em paralelo, como especifica a norma.

Devido à herança do DOE-2, a mesma limitação ocorre no EnergyPlus pois o objeto *Construction*, conforme será mostrado na Seção 4.2.2, apenas admite a entrada de camadas homogêneas de materiais, no sentido da camada externa para a interna. Este esquema de definição de componentes por camadas permite apenas a utilização de materiais compostos por resistências térmicas em série. Porém, para componentes mais complexos, como blocos ou tijolos, onde existem diferentes camadas paralelas aos fluxos de calor, é necessário desenvolver um componente equivalente à parede original.

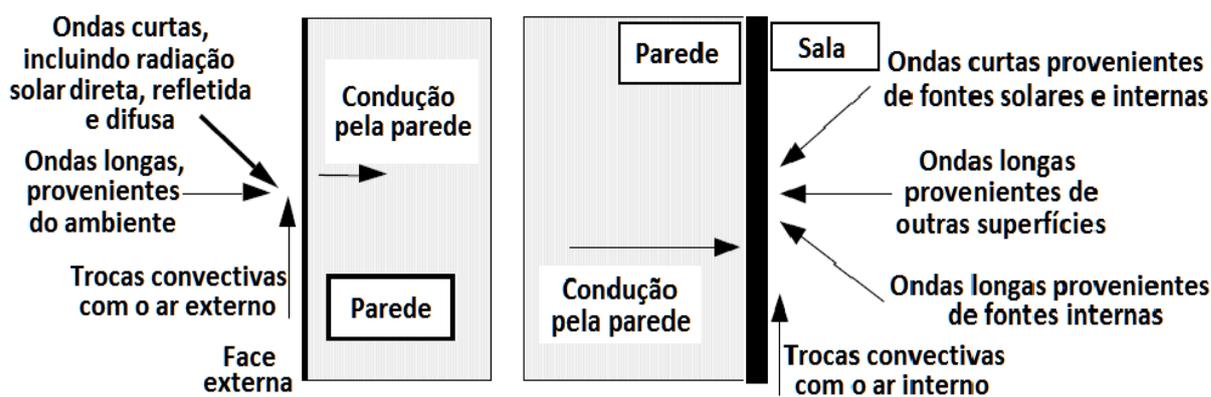
Em Ordenes et al. (2003), para desenvolver os modelos de componentes equivalentes, foi adotada uma alternativa em que se variam as espessuras e densidades de massa aparente dos materiais, mantendo-se constante a resistência térmica (R_t) e a capacidade térmica (C_t) entre as superfícies do componente. E os cálculos de R_t e C_t foram feitos conforme a metodologia de ABNT (2005c).

Dessa forma, a solução mais adequada encontrada pelos autores foi substituir as seções do tijolo (cerâmica) e da argamassa de assentamento, por uma câmara de ar central e duas camadas laterais de material cerâmico maciço. Assim, foram calculadas a espessura e a densidade de massa aparente das camadas de cerâmica, tais que proporcionassem as mesmas propriedades térmicas da parede final. E sempre foi considerada uma câmara de ar com espessura de 3 cm, ou seja, com resistência térmica de $0,16 \text{ m}^2\text{K/W}$, conforme Tabela B.1 da norma ABNT (2005c).

Outra consideração importante feita por Ordenes et al. (2003), é que o VisualDOE apresenta ao usuário um método de cálculo para a transmitância térmica, com parâmetros diferentes daqueles considerados na norma ABNT (2005c). Neste software, o fator global de transferência de calor (U), considera somente a resistência térmica do componente, enquanto na norma a transmitância térmica é definida considerando a resistência térmica superficial externa, a resistência térmica do componente e a resistência térmica superficial interna.

Embora o EnergyPlus e o DOE-2 não incluam as resistências térmicas superficiais nas propriedades dos componentes construtivos, estas são consideradas nos cálculos de simulação em ambos os algoritmos. Assim, com essa separação das resistências térmicas superficiais da transmitância global, os coeficientes de confecção nas superfícies das paredes podem ser

calculados por métodos diferentes para situações diversas. Segundo EnergyPlus (2013a), por exemplo, quando o ambiente externo indica que está chovendo, as superfícies externas expostas ao vento são assumidas como molhadas, o coeficiente de convecção é ajustado para um número elevado e a temperatura exterior utilizada para a superfície será a temperatura de bulbo úmido. Além disso, o EnergyPlus oferece várias opções de algoritmos para o cálculo dos coeficientes de convecção superficiais, que levam em conta até mesmo as frações radiantes do calor sensível, conforme mostra a Figura 4.7.



Fonte: adaptado de EnergyPlus (2013a)

Figura 4.7: Balanço de energia nas faces internas e externas de uma parede.

Sobre as parcelas de energia mostradas na figura, segundo ASHRAE (2009), cerca de 99% da radiação proveniente do sol possui comprimento de onda entre $0,3 \mu\text{m}$ e $3,5 \mu\text{m}$, e é chamada de radiação de ondas curtas ou solar, englobando os espectros ultravioleta, visível ($0,4 \mu\text{m}$ a $0,7 \mu\text{m}$) e parte do infravermelho. A faixa espectral compreendida entre $3,5 \mu\text{m}$ e $50 \mu\text{m}$, é chamada de radiação de ondas longas, infravermelha ou térmica, que contém a radiação proveniente do sol, do céu e, também, de corpos quentes dentro e fora do edifício, relacionada à fração radiante do calor sensível. Portanto, o EnergyPlus contabiliza todas essas parcelas no balanço de calor da envoltória, conforme a Figura 4.7.

Assim, as propriedades definidas para criar os elementos da biblioteca, são utilizados exclusivamente para os cálculos de resistência térmica dos componentes, também chamada resistência térmica de superfície à superfície, deixando as resistências superficiais por conta das rotinas de cálculo no DOE-2 e dos módulos de simulação no EnergyPlus.

Um inconveniente da modelagem de construções no EnergyPlus é a impossibilidade de se utilizar um material composto com coeficiente global de troca de calor definido pelo usuário. Pois, mesmo quando se conhece o coeficiente global, deve-se entrar com as camadas

de materiais que compõem sua estrutura, dificultando determinados tipos de testes de componentes e aumentando a possibilidade de erros. Dessa forma, a entrada de propriedades de materiais deve ser feita com cautela, de modo a não causar incoerências com os processos físicos reais que ocorrem na estrutura de alvenaria.

Assim, a partir de Ordenes et al. (2003), foram definidos aqui, 63 materiais de uso corrente no Brasil, entre concreto, cerâmica, gesso, madeira, vidro, etc. A Tabela 4.5 mostra alguns desses objetos, de onde se pode observar a metodologia de modelagem. Para o Material 4 - Tijolo Cerâmico de 8 Furos (20 cm), a espessura inserida (11,1 cm) refere-se a uma das camadas de cerâmica que será utilizada para compor a parede no objeto *Construction*.

Dessa forma, com uma câmara de ar de 3 cm entre duas camadas do Material 4, obtêm-se um componente construtivo com resistência térmica equivalente à de uma parede construída com tijolos vazados de 8 furos, considerando também a argamassa de assentamento.

Tabela 4.5: Dados de entrada do objeto *Material* para diversos materiais.

Materiais de Construção				
Concreto Pesado (20 cm)	Laje Mista (12 cm)	Madeira (2,5 cm)	Tijolo Cerâmico 8 Furos (20 cm)	Comentários do Arquivo IDF
Material, ConcretoPesado, MediumRough, 0.2032, 1.95, 2240, 900, 0.9, 0.7, 0.7;	Material, LajeMista, MediumSmooth, 0.095, 1.05, 1087, 920, 0.9, 0.7, 0.7;	Material, Madeira, MediumSmooth, 0.0254, 0.15, 608, 1630, 0.9, 0.7, 0.7;	Material, Tijolo8Furos, MediumSmooth, 0.111, 0.9, 646, 920, 0.9, 0.7, 0.7;	! -Classe do Objeto ! -Nome ! -Rugosidade ! -Espessura {m} ! -Condutividade {W/m-K} ! -Densidade {kg/m3} ! -Calor Específico {J/kg-K} ! -Absortância Térmica ! -Absortância Solar ! - Absortância Visível

Fonte: adaptado de Ordenes et al. (2003)

Além da classe de objetos *Material*, existem outras classes para modelar tipos mais específicos de materiais como divisórias, ou mesmo outros tipos de câmara de ar como as encontradas em portas e janelas com vidros duplos.

A Tabela 4.6 mostra estas classes, onde se destaca a grande quantidade de dados necessários para definir o objeto *WindowMaterial:Glazing*, utilizado para modelar uma folha de vidro de 3 mm de espessura (Material 9). Este objeto foi obtido da biblioteca de materiais do próprio EnergyPlus.

Tabela 4.6: Dados de entrada de materiais para objetos de outras Classes.

Divisória	
Campo de entrada	Comentário do arquivo IDF
Material:NoMass, Eucatex, Smooth, 0.058;	! -Classe ! -Nome ! -Rugosidade ! -Resistência Térmica {m2-K/W}
Câmara de Ar em Tetos	
Campo de entrada	Comentário do arquivo IDF
Material:AirGap, Camara Ar Teto, 0.18;	! -Classe ! -Nome ! -Resistência Térmica {m2-K/W}
Câmara de Ar em Paredes	
Campo de entrada	Comentário do arquivo IDF
Material:AirGap, Camara Ar Parede, 0.16;	! -Classe ! -Nome ! -Resistência Térmica {m2-K/W}
Câmara de Ar – Janelas com Vidros Duplos	
Campo de entrada	Comentário do arquivo IDF
WindowMaterial:Gas, Air 13mm, Air, 0.0127;	! -Classe ! -Nome ! -Tipo de Gás ! -Espessura {m}
Vidro Simples	
Campo de entrada	Comentário do arquivo IDF
WindowMaterial:Glazing, Clear 3mm, SpectralAverage, , 0.003, 0.837, 0.075, 0.075, 0.898, 0.081, 0.081, 0.000, 0.840, 0.840, 0.900;	! -Classe ! -Nome ! -Tipo de dados ópticos ! -Conjunto de dados espectrais para o vidro ! -Espessura {m} ! -Transmitância solar para incidência normal ! -Reflectância solar frontal para incidência normal ! -Reflectância solar traseira para incidência normal ! -Transmitância visível para incidência normal ! -Reflectância visível frontal para incidência normal ! -Reflectância visível traseira para incidência normal ! -Transmitância infravermelha para incidência normal ! -Emissividade hemisférica frontal ! -Emissividade hemisférica traseira ! -Condutividade {W/m-K}

Fonte: adaptado de EnergyPlus (2013a)

4.2.2 Construções

Com os materiais de construção modelados conforme mostrado na seção anterior, o próximo passo para a definição do arquivo IDF base, foi a modelagem das construções. Pelo IDF Editor, a entrada de dados para os objetos da Classe *Material* só pode ser feita com a digitação manual das propriedades termofísicas mostradas na Tabela 4.5. Por outro lado, a grande funcionalidade do IDF Editor em termos de praticidade de uso, são as listas de referência que permitem conectar (referenciar) objetos relacionados. Elas aparecem sempre quando o dado de entrada de determinado campo em um objeto, é o nome de outro objeto de classe diferente.

Para os objetos da classe *Construction*, por exemplo, os dados de entrada são: o nome da construção e os nomes dos objetos da classe *Material* para cada camada de material que compõe a parede em questão. Dessa forma, uma vez definidos os objetos *Material*, basta selecioná-los na lista de referência que aparece durante a edição dos campos do objeto *Construction*. Esta funcionalidade pode ser usada também em diversas outras classes de objetos, para selecionar as agendas de ocupação (objetos Classe *Schedules:Compact*), sistemas de condicionamento de ar (Classe *AirLoopHVAC*), nomes de zonas térmicas (Classe *Zones*), etc.

De forma geral, a edição das construções pelo IDF Editor é bastante simples, porém algumas particularidades do modelo EnergyPlus requerem cuidados e definição de objetos *Construction* adicionais. Uma dessas particularidades ocorreu no caso de construções com camadas assimétricas de materiais e que separam duas zonas térmicas adjacentes. Neste caso, deverão ser definidos dois objetos da Classe *Construction* com o mesmo número de camadas, porém com ordem inversa de materiais.

Mesmo que uma parede pertença fisicamente a duas zonas adjacentes, sob o ponto de vista do EnergyPlus, cada face da parede pertencerá a uma zona e deverá ser modelada independentemente. E como as construções são definidas no sentido da camada externa para a interna, caso a construção desta parede seja assimétrica, dois objetos *Construction* com ordem inversa de materiais deverão ser associados, cada um a uma face da parede. Como será visto em seguida, o mesmo deverá ser feito para os objetos da Classe *BuildingSurface:Detailed*, que deverá sempre ser definido em duplicidade para uma mesma parede, cada qual pertencente a uma das zonas adjacentes. Na modelagem deste trabalho, tal fato ocorreu para as lajes entre os pavimentos, que separam o plenum do entreferro do pavimento interior e o ambiente ocupado do pavimento superior.

Conforme mostra Tabela 4.7 (Construções 3 e 4), a construção em questão é formada por uma laje de concreto, uma camada de argamassa de contrapiso e uma camada de revestimento cerâmico (piso). Assim, foram definidas duas construções, uma chamada *Laje-Teto Plenum* e outra chamada *Laje-Piso Interno*, com materiais em ordem inversa. Caso essa regra não seja seguida, a simulação é interrompida e uma mensagem de erro é gerada no relatório de saída de erros. Por outro lado, construções simétricas podem ser usadas sem problemas para ambas as faces.

Tabela 4.7: Exemplos de definição para os objetos da Classe *Construction*.

Construção 1 Telhado Externo	Construção 2 Piso Térreo	Construção 3 Laje – Teto Plenum	Construção 4 Laje - Piso Interno	Comentários do Arquivo .idf
Construction,	Construction,	Construction,	Construction,	! -Classe
Telhado Externo,	Piso – Terreo,	Laje - Teto Plenum,	Laje - Piso Interno,	! -Nome
Telha Fibrocimento (0.7cm),	Concreto Macico (5 cm),	Piso Ceramico (10 cm),	Argamassa de Reboco (2.5 cm),	! –Camada externa
Resis. da lâmina de ar em tetos,	Piso Ceramico (10 cm);	Laje de Concreto (20 cm)	Laje de Concreto (20 cm),	! –Camada 2
Laje de Concreto (20cm),		Argamassa de Reboco (2.5 cm);	Piso Ceramico (10 cm);	! –Camada 3
Argamassa de Reboco (2.5cm);				! –Camada 4
				! –Camada 5

Fonte: adaptado de Ordenes et al. (2003)

Esse rigor na definição das construções e das faces se deve à aplicação das CTF's – ou funções de transferência de calor por condução (sigla em inglês para Conduction Transfer Function). Dessa forma, o EnergyPlus conecta as zonas térmicas adjacentes pelas paredes, aplicando o balanço de energia simultaneamente para todas as zonas. Por esta razão, até mesmo se duas faces opostas de uma mesma parede possuírem áreas diferentes, devido a zonas de dimensões diferentes, a simulação prosseguirá mas gerará um alerta dizendo que os cálculos de transferência de calor por meio das CTF's poderão ser imprecisos. Na edificação em estudo neste trabalho, tal fato ocorreu inúmeras vezes e várias superfícies tiveram de ser divididas, para o correto pareamento com as superfícies das zonas vizinhas, e para preservar a precisão nos cálculos de balanço de energia.

Assim, a biblioteca formada por estes materiais permite a modelagem de grande parte dos casos de empreendimentos imobiliários comumente encontrados no Brasil. Os objetos da Classe *Material*, mesmo em grande número, podem permanecer sem problemas no arquivo IDF, mesmo que não sejam usados em uma determinada simulação. Seus dados apenas são

obtidos pelos módulos de simulação do EnergyPlus quando estes são referenciados em um objeto da Classe *Construction*.

Por outro lado, mesmo que uma construção presente no arquivo IDF nunca seja utilizada na simulação, esta será processada e terá seu fator global de transferência de calor calculado, aumentando desnecessariamente o tempo de simulação. Portanto, objetos da Classe *Construction* apenas deverão ser definidos se forem realmente usados no modelo. Por uma questão de praticidade, algumas construções foram definidas e incluídas no IDF Base para que pudessem ser aplicadas pelo OpenStudio. Finalmente, as construções não utilizadas foram deletadas do modelo final.

Dos 63 materiais de uso corrente no Brasil, definidos a partir da metodologia de Ordenes et al. (2003), 18 foram utilizados em 12 construções diferentes no modelo final. Algumas dessas construções são mostradas na Tabela 4.7.

4.3 Envoltória

A segunda etapa da modelagem física da edificação em estudo, para posterior simulação em EnergyPlus, é a definição da envoltória. Para resultados satisfatórios, a estrutura da edificação deve ser modelada de forma a refletir de forma realista as propriedades físicas de transferência e armazenamento de calor de estruturas reais. Dessa forma, com a biblioteca de materiais e construções definidas no arquivo IDF Base, a envoltória foi modelada em Google SketchUp com o auxílio do complemento OpenStudio, conforme as próximas seções.

4.3.1 Zonas Térmicas

Para a modelagem da envoltória no SketchUp, cada ambiente do edifício deverá ser desenhado individualmente e serão as zonas térmicas do modelo. Inicialmente deverá ser utilizada a ferramenta *NewZoneTool* do OpenStudio, que cria um objeto da classe *Zone* e define seu sistema de coordenadas. Dentro da nova zona, o usuário pode desenhar a estrutura e o

modelo matemático gerado pelo SketchUp é convertido automaticamente no modelo termofísico de entrada no EnergyPlus.

Assim, a cada parede desenhada, automaticamente o OpenStudio gera um *BuildingSurface:Detailed* com base nas configurações padrão do arquivo IDF Base definido na seção anterior. Este objeto é utilizado para descrever detalhadamente as paredes da edificação, conforme se observou no exemplo mostrado na Tabela 3.2. Os dados atribuídos pelo OpenStudio são: nome (gerado aleatoriamente), o tipo de construção (referência aos objetos da classe *Construction*), a zona térmica a que a superfície pertence (referência ao objeto *Zone* criado pela ferramenta *NewZoneTool*), os vértices (provenientes do modelo CAD) e as condições ambientais no lado externo da parede.

Utilizando ainda toda a praticidade do *OpenStudio*, o usuário pode definir uma zona térmica completa com relativa facilidade. Para tanto, basta desenhar a planta baixa da sala com a ferramenta linha ou retângulo e extrudá-la com a ferramenta Puxar até a altura do pé direito. Dessa forma, para um modelo simples, a zona térmica modelada estará pronta para ser simulada, faltando apenas definir as cargas térmicas internas e os equipamentos condicionadores de ar.

No EnergyPlus, toda zona térmica retangular deve ser definida com, no mínimo seis objetos *BuildingSurface:Detailed*, quatro para as paredes, um para o teto e um para o piso. Esses objetos correspondem às faces internas das paredes desta zona, e, portanto, caso exista alguma zona adjacente, esta deverá ser modelada independentemente.

O OpenStudio permite definir como padrão, construções diferentes para paredes internas e externas. Usualmente, as paredes externas de construções típicas são mais grossas que as internas. Ainda, outros tipos de construções padrão podem ser definidas e aplicadas, como portas, vidraças, divisórias, etc. O programa ainda identifica se a entidade desenhada é uma parede, piso ou teto e aplica as orientações corretas e construções padrão do arquivo IDF Base.

No entanto, ao se criar uma nova zona, todas as superfícies são definidas como paredes externas expostas ao sol e ao vento, pois o OpenStudio ainda não é capaz de identificar automaticamente a existência de zonas vizinhas. Para isso, existe a ferramenta *SurfaceMatch* (pareamento de superfícies) que faz o casamento de duas paredes adjacentes e define corretamente os campos relativos às construções e condições opostas da superfície. Dessa

forma, o OpenStudio identifica quais superfícies são externas e quais são internas e aplica a construção padrão correspondente.

Portando, em uma edificação complexa como a modelada neste trabalho, onde cada sala faz fronteira com diversas outras, a ferramenta *SurfaceMatch* foi bastante utilizada. No EnergyPlus, quando uma parede A separa duas zonas Z1 e Z2, a parede A deverá ser modelada por dois objetos *BuildingSurface:Detailed*, um para a parede A1 pertencente a Z1 e outro para a parede A2 pertencente a Z2. Neste caso, conforme foi dito na Seção 0, as construções de A1 e A2 deverão ter o mesmo número de camadas, porém em ordem inversa de materiais. Caso contrário a simulação retornará um aviso de erro e não poderá continuar. Com as construções corretamente definidas como padrão no OpenStudio, a função *SurfaceMatch* se encarrega de definir as construções corretas de A1 e A2.

Outro aspecto importante na definição de objetos da classe *Building Surface:Detailed*, é a entrada correta das condições no lado oposto da parede no campo *Outside Boundary Condition*. Assim, a face oposta pode ser o ambiente externo (exposto ou não a sol e vento), outra superfície ativa (objeto *BuildingSurface:Detailed*), outra sala (objeto *Zone*) ou um conjunto de condições definidas pelo usuário (pelos objetos *OtherSideConditionsModel* ou *OtherSideCoefficients*). Para este campo, a ferramenta *SurfaceMatch* também cumpre bem seu papel e referencia corretamente as superfícies opostas. No caso do exemplo do parágrafo anterior, a ferramenta *SurfaceMatch* faz referência a A2 como face oposta de A1 e A1 como face oposta de A2.

Como se pode notar, então, o OpenStudio facilita muito a modelagem da envoltória para simulação em EnergyPlus. Porém, como a edificação objeto de estudo deste trabalho é bastante complexa, em muitos casos a ferramenta *SurfaceMatch* falhou. Geralmente, em arquivos CAD, ocorrem pequenas diferenças nas coordenadas de pontos que formam uma entidade matemáticas. Assim, ao se desenhar outra entidade adjacente, como a parede de um ambiente vizinho, utilizando-se os vértices da primeira entidade como guia, estas diferenças matemáticas aparecem e comprometem o correto pareamento das superfícies, que é feito pelo aplicativo a partir de suas coordenadas. Assim, vários campos dos 767 objetos da Classe *BuildingSurface:Detailed* do modelo tiveram de ser definidos manualmente. Nestes casos, a edição direta do texto do arquivo IDF, pelo Bloco de Notas do Sistema Operacional Windows, mostrou-se mais rápida e prática, devido à procura do texto pelo nome da superfície, o que é muito mais trabalhoso tanto no Google SketchUp como no IDF Editor.

Além da complexidade da edificação, o elevado número de objetos *BuildingSurface:Detailed* se deve à necessidade de dividir inúmeras superfícies para permitir o correto pareamento com as superfícies adjacentes, conforme explicado na Seção 0. Dessa forma, permite-se que dois objetos *BuildingSurface:Detailed* mutuamente referenciados um ao outro, fiquem com a mesma área, preservando-se a precisão nos cálculos de balanço de energia por meio das funções de transferência de calor por condução, ou CTF's.

A Figura 4.8 e a Figura 4.9, em seguida, mostram mais detalhes do modelo final do edifício objeto de estudo deste trabalho. A Figura 4.8 mostra uma vista lateral da entrada principal, que dá acesso à recepção e, a Figura 4.9 mostra uma vista traseira da edificação.



Figura 4.8: Vista da entrada principal do empreendimento.

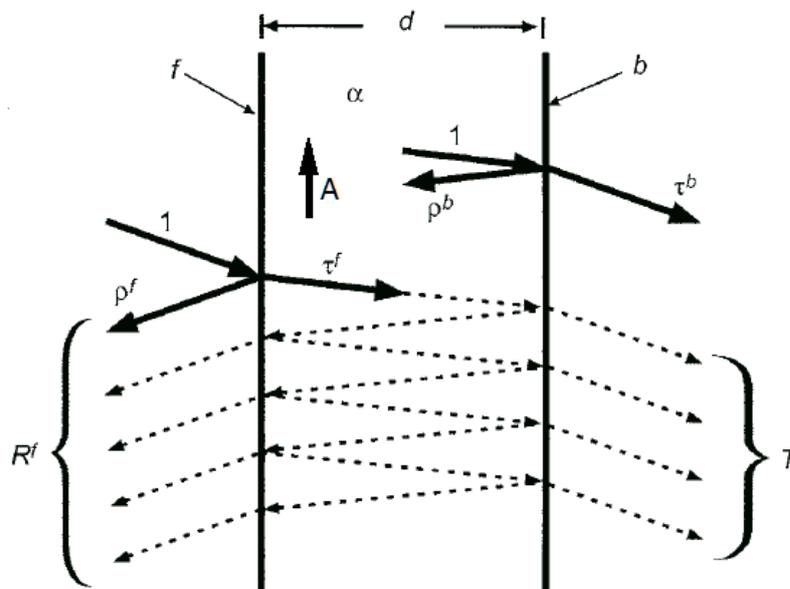


Figura 4.9: Vista traseira do empreendimento.

4.3.2 Janelas e Portas

Através do OpenStudio, também se pode modelar as janelas, portas, domos e claraboias que eventualmente estiverem presentes. Para tanto, basta utilizar as ferramentas Linha ou Retângulo do SketchUp sobre uma superfície *BuildingSurface:Detailed* existente e o complemento reconhecerá que se trata de um elemento diferente. De forma similar à modelagem de paredes, o OpenStudio reconhecerá se a entidade modelada é uma porta ou janela e aplicará a construção padrão correspondente. As superfícies das portas e janelas, seja de vidro madeira ou outros materiais, são modeladas no EnergyPlus pelos objetos da Classe *FenestrationSurface:Detailed*, que são criados automaticamente pelo OpenStudio.

Segundo ASHRAE (2009), a radiação solar que passa de um meio para outro é parcialmente transmitida e parcialmente refletida na interface entre os dois meios. Além disso, uma fração adicional é absorvida pelo material. Assim, materiais que não absorvem a radiação completamente, tal como ar ou vidro, são classificados como transparentes ou translúcidos. Dessa forma, considerando a radiação total incidente sobre uma folha de vidro com espessura d , uma parte é transmitida (T), outra parte é refletida (R) e outra, ainda, é absorvida (A). As propriedades dos materiais relacionadas a cada uma dessas parcelas da energia solar são a Transmitância (τ), a Reflectância (ρ) e a Absortância (α), conforme mostra a Figura 4.10.



Fonte: adaptado de ASHRAE (2008)

Figura 4.10: Incidência de radiação solar sobre o vidro.

Conforme se observa, essas propriedades ainda incluem os efeitos das diversas inter-reflexões nas superfícies internas do vidro. Ainda da Figura 4.10, o índice f denota a face frontal (externa à sala) e b a face traseira (interna à sala), assim τ^f é a transmitância frontal e τ^b é a transmitância traseira. Finalmente, a transmitância, a reflectância e a absortância de uma camada de vidro, são formalmente definidas como as frações de fluxo de radiação que são transmitidas, refletidas e absorvidas, respectivamente, incluindo os efeitos de inter-reflecção, e sua soma deve ser igual à unidade.

Assim, o ganho de calor pela janela é a soma da radiação solar transmitida diretamente para dentro e a porção da radiação absorvida pelo vidro que é transferida para o interior por convecção. Uma vez que o calor também é conduzido para dentro da zona térmica devido à diferença de temperatura entre ar externo e ar interno, o ganho de calor total através da janela também deve levar em conta a condutividade do vidro.

Dessa forma, a Tabela 4.8 mostra os dados de entrada para objetos da Classe *WindowMaterial:Glazing*, onde se nota que todos os fatores mencionados nos parágrafos anteriores são considerados nos cálculos efetuados pelo EnergyPlus, durante as simulações.

Tabela 4.8: Dados de entrada para uma folha de vidro simples com 3mm de espessura.

Vidro Simples	
Campo de entrada	Comentários do Arquivo IDF
WindowMaterial:Glazing,	! –Classe
Clear 3mm,	! –Nome
SpectralAverage,	! –Tipo de dados ópticos
,	! –Conjunto de dados espectrais para o vidro
0.003,	! –Espessura {m}
0.837,	! –Transmitância solar para incidência normal
0.075,	! –Reflectância solar frontal para incidência normal
0.075,	! –Reflectância solar traseira para incidência normal
0.898,	! –Transmitância visível para incidência normal
0.081,	! –Reflectância visível frontal para incidência normal
0.081,	! –Reflectância visível traseira para incidência normal
0.000,	! –Transmitância infravermelha para incidência normal
0.840,	! –Emissividade hemisférica frontal
0.840,	! –Emissividade hemisférica traseira
0.900;	! –Condutividade {W/m-K}

Fonte: adaptado de EnergyPlus (2013d).

A energia solar que adentra ao recinto não é uma carga térmica instantânea já que ela deve primariamente ser absorvida pelo piso, paredes interiores e mobília, para depois ser transferida por convecção para o ar interno. As características de armazenamento térmico da estrutura do edifício e dos objetos no seu interior determinam a defasagem térmica e, portanto,

a relação entre o ganho de calor e a carga de refrigeração. Por esta razão, a capacitância térmica (massa x calor específico) da estrutura do seu conteúdo deve ser levada em conta nestes casos. A redução no pico da carga de refrigeração causada pela defasagem térmica pode ser extremamente importante para o dimensionamento do equipamento de climatização. No EnergyPlus, todos esses fatores são levados em conta e, inclusive, os componentes da radiação solar transmitida e absorvida são tratados separadamente. De forma geral, toda a fração radiante do calor sensível, seja emitida por pessoas, iluminação ou equipamentos, são calculados de forma específica.

Ao se modelar uma janela de vidro pelo SketchUp/OpenStudio, o plugin faz referência automaticamente a superfície base *BuildingSurface:Detailed* no objeto *FenestrationSurface:Detailed*. Desse modo, cada componente é tratado corretamente como superfície opaca ou transparente e os cálculos de transferência de calor são feitos adequadamente para cada tipo. Vale ressaltar que as áreas dos componentes ativos de transferência de calor, sejam janelas ou paredes (assim como as áreas das zonas térmicas) não são dados de entrada nos objetos correspondentes e, portanto, não são inseridos pelo OpenStudio. O próprio EnergyPlus calcula todas as áreas a partir das coordenadas dos vértices de cada entidade, no início das simulações. Dessa forma, os vértices sim são dados de entrada e são inseridos nos objetos *BuildingSurface:Detailed* e *FenestrationSurface:Detailed* pelo OpenStudio, a partir das coordenadas matemáticas do SketchUp; na metodologia de modelagem empregada neste trabalho.

Assim como no caso das paredes, devido às diferenças nas coordenadas matemáticas, em alguns casos, a definição automática da janela falha, pois o aplicativo não consegue associá-la com sua superfície base. Assim, alguns campos devem ser inseridos manualmente, principalmente as referências entre a janela e a parede que a contém e vice-versa. Quando erros e incoerências de geometria são detectados a simulação falha e o relatório de erros gerado pelo EnergyPlus pode ser utilizado para identificar e resolver os problemas. E as correções nos objetos com campos incoerentes ou incompletos podem ser corrigidas manualmente pela forma mais conveniente para cada caso, seja pelo SketchUp/OpenStudio, IDF Editor ou pela edição direta do arquivo texto no Bloco de Notas do Sistema Operacional Windows. Na modelagem efetuada foram definidos 250 objetos *FenestrationSurface:Detailed*.

4.3.3 Dispositivos de Sombreamento

Outro tipo de superfície que pode ser modelada com o OpenStudio são os dispositivos de sombreamento através do objeto *ShadingBuilding:Detailed*. Com este se pode modelar desde a marquise sobre a entrada do edifício até prédios vizinhos. Desta forma, não existe a necessidade de modelar as construções dos arredores. Pode-se apenas inserir um retângulo vertical através do objeto *ShadingBuilding:Detailed*, conforme se vê na Figura 4.11.



Figura 4.11: Dispositivos de sombreamento e edifícios vizinhos.

4.3.4 Geolocalização

Durante a modelagem em Google SketchUp, também pode-se posicionar geograficamente o modelo através do cruzamento de informações com o banco de dados da Google. O modelador SketchUp possui uma ferramenta chamada Geolocalização, para que os usuários possam posicionar seus modelos de edifícios e monumentos em seus locais reais. Com a posição definida, o modelo fica disponível para visualização no Google Earth. No âmbito deste trabalho, a ferramenta de geolocalização é útil para definir a orientação das fachadas do modelo com relação aos pontos cardeais, e garantir a precisão dos cálculos de incidência solar e sombreamentos. Tais dados são inseridos no modelo por um objeto da Classe *Site:Location*.

As coordenadas geográficas da localidade também podem ser definidas desta forma, porém estas não têm grande relevância frente à localização definida pelo arquivo climático. Apenas quando existe uma disparidade muito grande entre as coordenadas geográficas inseridas pelo objeto *Site:Location* e as coordenadas do arquivo climático, o EnergyPlus gera um alerta sobre o uso de um arquivo climático de localidade incorreta.

4.4 Cargas Internas

Com a envoltória e toda a estrutura física da edificação corretamente modelada e simulada sem ocupação, equipamentos e condicionadores internos, e com todos os erros corretamente solucionados, a terceira etapa da modelagem termofísica da edificação é a caracterização dos perfis de ocupação, de uso dos equipamentos elétricos, iluminação e períodos de utilização para todas as zonas térmicas presentes no modelo. Estes dados serão utilizados nos cálculos das cargas internas de geração de calor dos ambientes.

4.4.1 Pessoas, Iluminação e Equipamentos Elétricos

As cargas internas devido às pessoas, iluminação e equipamentos elétricos, mostradas na Tabela 4.1, na Tabela 4.2, na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4, são modeladas, respectivamente, pelas Classe *People*, *Lights* e *ElectricEquipment*. Quanto às pessoas, a Tabela 4.9 mostra como exemplo, os dados de entrada para o objeto da Classe *People* para o ambiente Convivência.

Tabela 4.9: Geração interna de calor devido às pessoas.

Pessoas	
Campo de entrada	Comentários do arquivo IDF
People,	! –Classe
PavT_Convivencia - Pessoas,	! –Nome
PavT_Convivencia,	! –Zona
Ocupacao DCV-CO2 Conv,	! –Agenda de variação do número de pessoas
People,	! –Método de cálculo do número de pessoas
100,	! –Número de pessoas {pessoas}
,	! –Número de pessoas por área {pessoas/m2}
,	! –Área por número pessoas {m2/ pessoas }
0.3,	! –Fração radiante {1}
autocalculate,	! –Fração de calor sensível {1}
Office Activity Schedule,	! –Agenda de atividade metabólica
0.0000000382,	! –Taxa de geração de dióxido de carbono {m3/s-W}
,	! –Ativar alertas de conforto 55 Comfort
ZoneAveraged,	! –Tipo de cálculo da Temperatura Radiante Média
,	! –Nome da lista de Superfícies/Fator angular
Office Work Eff. Schedule,	! –Agenda de eficiência do trabalho
ClothingInsulationSchedule,	! –Método de cálculo da isolamento das vestimentas
,	! –Agenda do cálculo da isolamento das vestimentas
Office Clothing Schedule,	! –Agenda da isolamento das vestimentas
Office Air Velocity Schedule,	! –Agenda da velocidade do ar
Fanger,	! –Modelo de conforto térmico 1
AdaptiveASH55;	! –Modelo de conforto térmico 2

Fonte: adaptado de EnergyPlus (2013d)

Observa-se que, além de simplesmente inserir no modelo o número de pessoas que ocupam o recinto, a Classe *People* ainda é responsável por obter os dados referentes às flutuações de ocupação no ambiente, ao metabolismo (que influenciará na geração de calor e de CO₂), às frações de calor latente e sensível (este último dividido em radiante e convectivo) e ao conforto dos ocupantes, que pode ser calculado por dois modelos diferentes. Portanto, os objetos da Classe *People* também são importantes para as análises de concentração de CO₂ e para a aplicação dos métodos de controle da renovação de ar, através da técnica da Ventilação Sob Demanda (DCV).

Quanto à iluminação, a modelagem é feita pelos objetos da Classe *Lights*, conforme mostra a Tabela 4.10. Além da intensidade de iluminação nos ambientes, por esta classe de objetos também é feita a variação de seu uso ao longo do tempo, como por exemplo durante a noite, quando a maior parte das luzes permanecem desligadas. Também faz o fracionamento do calor gerado entre as porcentagens que vão para o retorno e, entre parcelas radiantes e visíveis.

Tabela 4.10: Geração interna de calor devido à iluminação.

Iluminação	
Lights,	! –Classe
PavT_Convivencia - Iluminação,	! –Nome
PavT_Convivencia,	! –Zona
Office Lights Schedule,	! –Agenda de funcionamento
Watts/Area,	! –Método de cálculo da intensidade de iluminação
,	! –Intensidade de iluminação
12,	! –Watts por área {W/m ² }
,	! –Watts por pessoa {W/pessoa}
0,	! –Fração de calor no retorno {1}
0.37,	! –Fração radiante
0.18,	! –Fração visível
0,	! –Fração substituível
Lights,	! –Categoria de consumo final
No;	! –Fração no retorno calculada pela temp. do plenum

Fonte: adaptado de EnergyPlus (2013d)

Finalmente, quanto aos equipamentos elétricos, a modelagem é feita pelos objetos da Classe *ElectricEquipment*, conforme mostra a Tabela 4.11. Por esta Classe são inseridas no modelo as informações das potências totais dos equipamentos, assim como seus perfis de utilização. Neste caso, os equipamentos se resumem simplesmente a computadores e outros do gênero, porém a Classe *ElectricEquipment* pode ser utilizada para modelar qualquer tipo de equipamentos elétricos, tanto com cargas exclusivamente sensíveis, como com alta fração latente. Observa-se também, que tanto a Classe *Lights* como a Classe *ElectricEquipment* permitem dividir o consumo dos equipamentos em categorias de uso final, facilitando as análises de cada parcela do consumo anual do edifício.

Tabela 4.11: Geração interna de calor devido aos equipamentos elétricos.

Equipamentos	
ElectricEquipment,	! –Classe
PavT_Convivencia - Equipamentos,	! –Nome
PavT_Convivencia,	! –Zona
Office Equipment Schedule,	! –Agenda de funcionamento
Watts/Area,	! –Método de cálculo da intensidade de equipamentos
,	! –Intensidade de equipamentos {W}
5,	! –Watts por área {W/m2}
,	! –Watts por pessoa {W/pessoa}
0,	! –Fração latente
0.3,	! –Fração radiante
0,	! –Fração perdida
ElectricEquipment;	! –Categoria de consumo final

Fonte: adaptado de EnergyPlus (2013d)

4.4.2 Perfis de Utilização

Inicialmente são definidos os padrões de uso gerais da edificação, que se referem à localidade na qual está inserida, no caso a cidade de São Paulo. Define-se, então, os feriados nacionais, estaduais e municipais pela Classe *RunPeriodControl:SpecialDays* e o período de horário de verão, pela Classe *RunPeriodControl:DayLightSavingPeriod*. Tabela 4.12 mostra esses objetos.

Tabela 4.12: Dados de entrada para feriados e horário de verão.

Feriados	
RunPeriodControl:SpecialDays,	! –Classe
Confraternizacao Universal,	! –Nome
January 1,	! –Data de início
1,	! –Duração {dias}
Holiday;	! –Tipo de dia especial

Horário de Verão	
RunPeriodControl:DaylightSavingTime,	! –Classe
10/20,	! –Data de início
02/17;	! –Data de final

Os objetos mostrados na Tabela 4.12 controlam a atividade diária no empreendimento comercial em questão. Quanto a atividade horária, a Classe de objetos que faz a modelagem do comportamento dos usuários, dos equipamentos e algumas características de controle dos sistemas de condicionamento de ar, é a *Schedule:Compact*, mostrada a Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Agenda de ocupação para a Convivência.

Ocupação na Convivência	
Schedule:Compact,	!-Classe
Ocupacao DCV-CO2 Conv,	!-Nome
Fraction,	!-Tipo de dados da agenda
Through: 12/31,	!-Campo 1
For: Monday Tuesday Wednesday Thursday,	!-Campo 2
Until: 08:00,	!-Campo 3
0.0,	!-Campo 4
Until: 12:00,	!-Campo 5
0.3,	!-Campo 6
Until: 14:00,	!-Campo 7
0.5,	!-Campo 8
Until: 17:00,	!-Campo 9
0.3,	!-Campo 10
Until: 19:00,	!-Campo 11
0.5,	!-Campo 12
Until: 20:00,	!-Campo 13
0.25,	!-Campo 14
Until: 24:00,	!-Campo 15
0,0;	!-Campo 16

No ambiente Convivência do Pavimento Térreo, tem-se um perfil de ocupação com intensa variação ao longo do dia, que é bastante interessante para a análise do comportamento do Controle de Ventilação sob Demanda (DCV), um dos objetivos deste trabalho. Assim, a Tabela 4.13 mostra uma parte deste objeto, onde os valores fracionários após a chave *Until* denotam a fração da ocupação nominal do ambiente, até naquele momento. Por exemplo, até 8:00 da manhã a ocupação do ambiente é de 0%, até 12:00 a ocupação é de 30% (30 pessoas conforme Tabela 4.1), e assim por diante. Para os demais ambientes, com exceção dos auditórios e salas de reuniões, as agendas de ocupação são típicas de escritórios, conforme Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Agenda de ocupação para os escritórios.

Ocupação nos Escritórios	
Schedule:Compact,	!-Classe
Ocupacao Escritórios,	!-Nome
Fraction,	!-Tipo de dados da agenda
Through: 12/31,	!-Campo 1
For: Weekdays,	!-Campo 2
Until: 08:00,	!-Campo 3
0.0,	!-Campo 4
Until: 12:00,	!-Campo 5
0.95,	!-Campo 6
Until: 13:00,	!-Campo 7
0.3,	!-Campo 8
Until: 17:00,	!-Campo 9
0.95,	!-Campo 10
Until: 18:00,	!-Campo 11
0.75,	!-Campo 12
Until: 24:00,	!-Campo 13
0.0;	!-Campo 14

Os objetos da Classe *Schedule:Compact*, que serviram de base para definição daqueles mostrados na Tabela 4.13 e na Tabela 4.14, foram obtidos de EnergyPlus (2013d) *apud* ASHRAE (1989b). E a Figura 4.12 mostra graficamente a variação da ocupação ao longo das horas do dia 04 de Janeiro de 2013, uma sexta-feira.

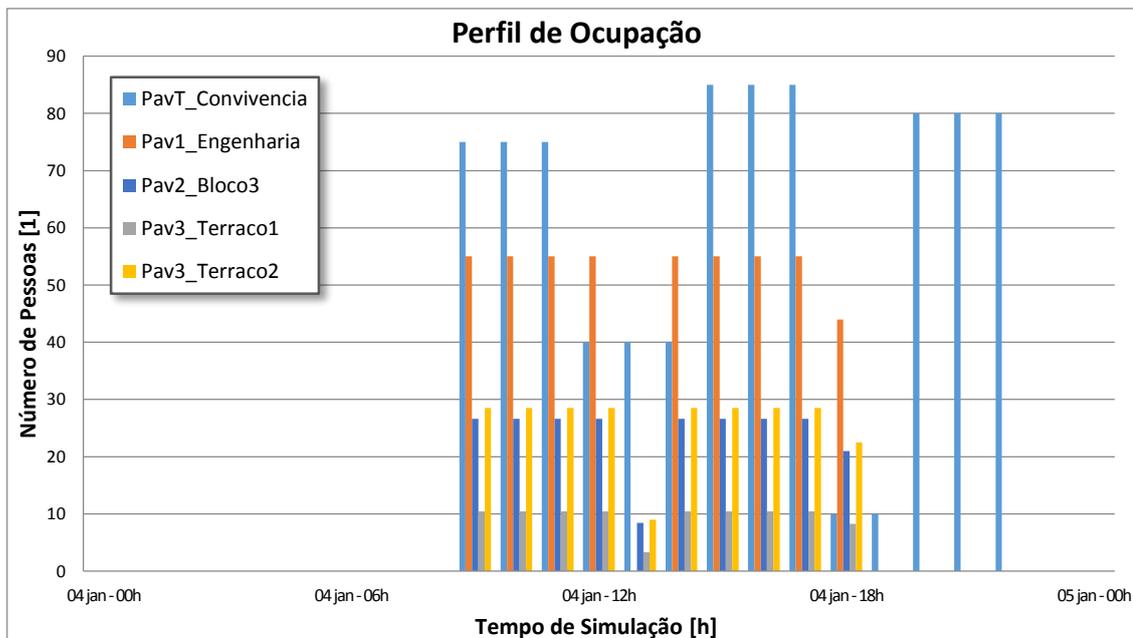


Figura 4.12: Variação da ocupação dos ambientes ao longo do dia.

4.4.3 Ventilação e Renovação de Ar

Para a determinação da taxa de ar externo para renovação são utilizados dois parâmetros: um que relaciona a necessidade de renovação com a área do ambiente condicionado e outro com o número de pessoas que ocupa o mesmo, sempre se considerando a finalidade do recinto condicionado. Os dois componentes somados resultam na taxa de ar externo para o ambiente em questão, e que adicionado às taxas de ar externo dos demais ambiente, resultam na taxa total de renovação de ar que deverá ser fornecida pelo sistema de ar-condicionado central. Segundo ABNT (2008c), estes componentes são de $0,57 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ e $3,80 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pessoa}^{-1}$, respectivamente, para escritórios de baixa a alta densidade de ocupação.

Portanto, para garantir que o sistema possa atender a carga térmica ao longo do ano todo, na fase de projeto são consideradas as piores condições quanto às cargas térmicas internas e externas. Ou seja, a ocupação do ambiente, o uso de equipamentos elétricos, a transmissão de

calor devido à diferença de temperatura, os ganhos de calor por insolação, a ventilação de renovação, as condições climáticas, etc, são definidas para condições extremas. Assim, com base nos componentes do ar de renovação dados por ABNT (2008c), calcula-se a taxa de ar externo para a máxima ocupação dos ambientes e, a partir desses valores, o equipamento condicionador de ar é selecionado.

No EnergyPlus, os objetos da Classe *DesignSpecification:OutdoorAir* indicam os valores a serem utilizados para dimensionamento das vazões de ar externo dos sistemas, conforme mostra a Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Especificação da vazão de ar externo de projeto.

Ar Externo de Projeto para Convivência	
DesignSpecification:OutdoorAir,	! –Classe
Ar Externo PavT_Convivencia,	! –Nome
Sum,	! –Método de cálculo do ar externo
0.0057,	! –Fluxo de ar externo por pessoa {m3/s-pessoa}
0.0005;	! –Fluxo de ar externo por área {m3/s-m2}
Ar Externo de Projeto para Engenharia	
DesignSpecification:OutdoorAir,	! –Classe
Ar Externo PavT_Engenharia,	! –Nome
Sum,	! –Método de cálculo do ar externo
0.0038,	! –Fluxo de ar externo por pessoa {m3/s-pessoa}
0.0005;	! –Fluxo de ar externo por área {m3/s-m2}

4.5 Sistema de Condicionamento de Ar

No âmbito do algoritmo EnergyPlus, segundo EnergyPlus (2013b), um sistema é formado não só pelo equipamento condicionador de ar, mas também pelas zonas térmicas atendidas por este. Assim, o sistema de condicionamento de ar deve ser capaz de atender às cargas térmicas internas e externas, em determinado momento.

As cargas internas incluem os ganhos de calor que ocorrem dentro dos ambientes condicionados, na porção do sistema definido por EnergyPlus (2013b) como “lado de demanda”, contabilizado pelo calor gerado internamente devido às características de ocupação, uso de equipamentos, calor transmitido ao ambiente devido às condições externas, etc.

As cargas externas são aquelas que não ocorrem nos ambientes, mas no equipamento condicionador em si, porção do sistema definida por EnergyPlus (2013b) como “lado de

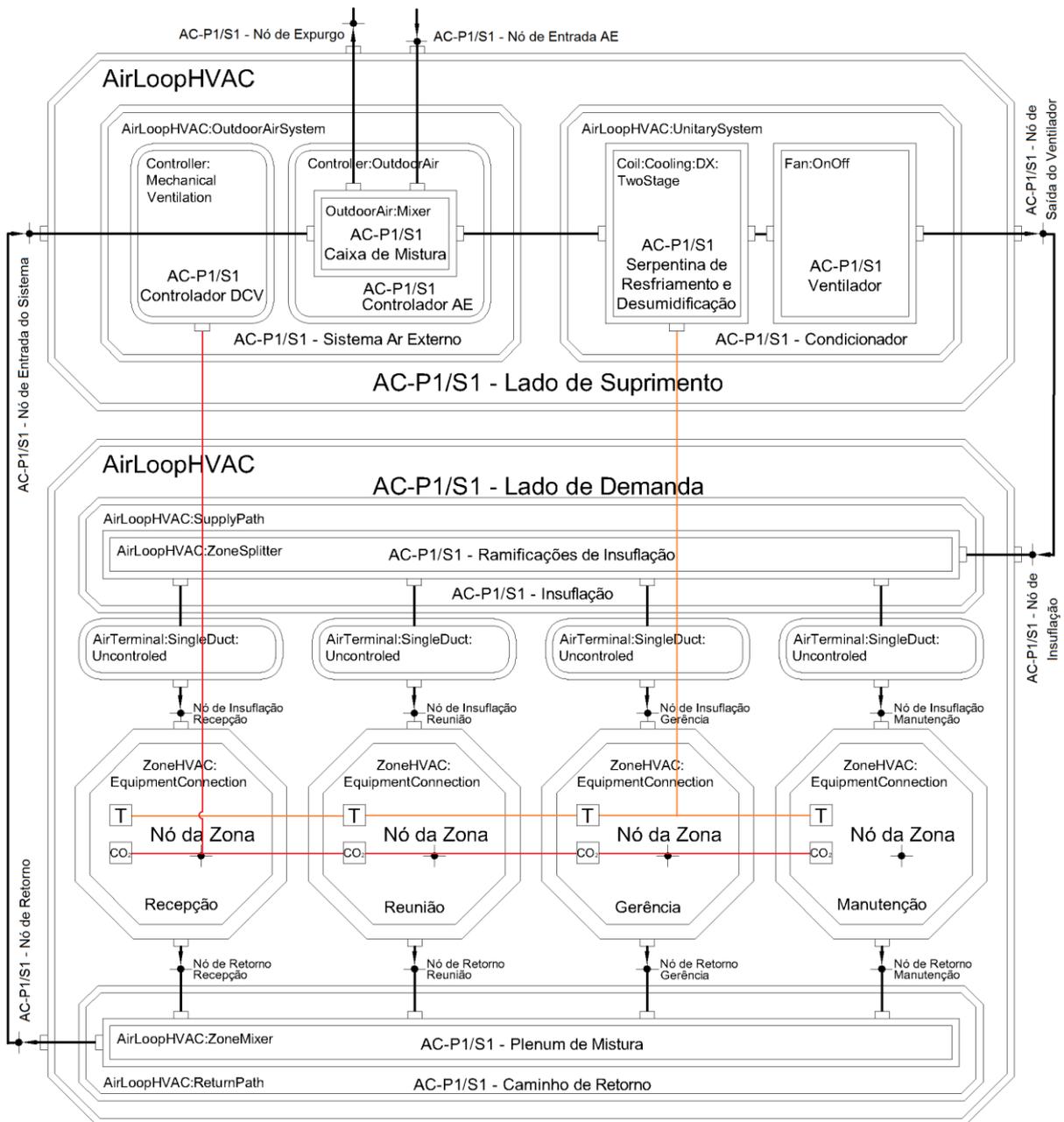
suprimento”, contabilizadas pelo calor inserido no sistema pelo ar externo de renovação, dissipado pelo motor do ventilador, etc.

A partir do modelo apresentado na seção anterior, implementa-se um sistema de ar-condicionado do tipo “Splitão”, ou “condicionador autônomo compacto (*Self Contained*)” segundo designação da norma ABNT (2008c). Este equipamento é dividido em duas partes, sendo a unidade interna (evaporadora) dotada de serpentina de resfriamento e desumidificação e ventilador, e a unidade externa (condensadora), composta por serpentina de condensação, ventilador e compressor, segundo ASHRAE (2008). Neste trabalho, este tipo de equipamento será identificado pelo código AC, seguido do pavimento a que atende, durante a apresentação dos resultados.

Conforme EnergyPlus (2013b), este equipamento é chamado “*Unitary*” e é definido pelos objetos *HVACTemplate:Zone:Unitary* e *HVACTemplate:System:UnitarySystem*. A cada ambiente a ser condicionado deve ser associado um objeto *HVACTemplate:Zone:Unitary* e estes, por sua vez, devem ser associados a um objeto *HVACTemplate:System:Unitary*, formando um determinado sistema. Deve-se ressaltar que os objetos do grupo *HVACTemplate* não representam, ainda, o sistema de ar-condicionado em questão e nem mesmo serão utilizados diretamente na simulação. Eles apenas são utilizados com o objetivo de coletar todos os dados de entrada do usuário, para o sistema em questão, a partir de um único lugar e simplificar a modelagem.

Conforme EnergyPlus (2013a), antes do início da simulação os objetos *HVACTemplate* serão pré-processados por um programa chamado *ExpandObjects.exe*, que irá gerar automaticamente todos os objetos que formam o sistema e que possuem funções específicas dentro do modelo. O uso dos *HVACTemplate* é útil pois define de forma automatizada e consistente todos os nós que ligam um componente (objeto, no âmbito do modelo) aos demais. Ainda, insere corretamente as diversas referências entre os objetos, necessárias à simulação do equipamento.

A Figura 4.13 mostra de forma esquemática todos os objetos das diversas Classes que formam um sistema Unitário, com seus respectivos nós de sistema, e as interconexões (referências) entre estes objetos. Cada um desses nós (identificados pelas setas) deveria ser inserido manualmente caso os objetos *HVACTemplate* não fossem usados. As linhas pretas grossas indicam, os fluxos de ar ao longo dos componentes, enquanto as linhas laranjas finas representam sinais de temperatura e as linhas vermelhas finas, os sinais de controle de CO₂.



Fonte: elaborada com base em EnergyPlus (2013b)

Figura 4.13: Mapa dos nós de sistema do EnergyPlus para o Sistema AC-P1/S1.

Após o pré-processamento, o sistema é simulado para os dias de projeto de inverno e verão, quando são feitos os dimensionamentos dos componentes de cada sistema. Nesta etapa, são calculadas as capacidades das serpentinhas de resfriamento, aquecimento, reaquecimento (se houver), vazões de insuflação, vazões de ar externo, vazões nos terminais de insuflação para cada ambiente, etc., a partir dos valores máximos dos ganhos de calor mostrados nas últimas seções. Uma vez dimensionados os componentes, o programa executa automaticamente a simulação para o ano todo.

Ao se executar uma simulação em EnergyPlus, o programa calcula um número extremamente grande de variáveis, relacionados a todos os objetos presentes no arquivo de entrada. Assim, dependendo das análises que se deseja fazer, deve-se solicitar que as variáveis de interesse sejam reportadas pelo EnergyPlus, através da Classe de objetos *Output:Variable*, conforme EnergyPlus (2013b). Por exemplo, no próximo Capítulo serão analisadas as condições internas dos ambientes, portanto as variáveis que devem ser reportadas são a temperatura de bulbo seco interna, a umidade relativa interna e a concentração interna de CO₂, etc.

Com as variáveis de saída selecionadas, após a simulação o EnergyPlus reporta cada uma delas, para que se possa utilizá-las em análises posteriores. Dessa forma, um formato de saída que é particularmente muito útil, é o de valores separados por vírgula, com a extensão CSV. Assim, pode-se importar os dados para um programa qualquer de planilha eletrônica para gerar gráficos e realizar cálculos adicionais.

A Tabela 4.16 mostra os sistemas de condicionamento de ar definidos neste trabalho, bem como suas capacidades e os ambientes atendidos.

Tabela 4.16: Condicionadores Autônomos Compactos, ambientes atendidos e capacidades.

Sistema	Ambientes Atendidos	Capacidade
AC-PT/S1	Recepção	16,9 kW (4,8 TR) 3.384 m ³ /h
	Corredor	
	Sala 1	
	Sala 2	
AC-PT/S2	Convivência	23,2 kW (6,6 TR) 3.389 m ³ /h
AC-P1/S1	Recepção	19,6 kW (5,6 TR) 4.104 m ³ /h
	Reunião	
	Gerência	
	Manutenção	
AC-P1/S2	Engenharia	26,2 kW (7,5 TR) 5.436 m ³ /s
	TI	
AC-P1/S3	Auditório	15,6 kW (4,5 TR) 2.531 m ³ /h
AC-P2/S1	Bloco 1	30,1 kW (8,6 TR) 6.408m ³ /s
	Bloco 2 - Recepção	
	Bloco 2 - Operacional	
	Bloco 2 - Reunião	
AC-P2/S2	Bloco 3	26,0 kW (7.4 TR) 5.508 m ³ /h
	Bloco 4	
	Bloco 5	
	Bloco 6	
AC-P3/S1	Cobertura 1	13,3 kW (3,9 TR) 2.769 m ³ /h
AC-P3/S2	Cobertura 2	14,6 kW (4,2 TR) 2.823 m ³ /h

Para melhor identificar cada sistema, convencionou-se agrupá-los pelo Pavimento do edifício no qual estão instalados, sendo em seguida, numerados sequencialmente. Portanto PT/S1 denota Pavimento Térreo – Sistema 1, P1/S3 refere-se à Pavimento 1 – Sistema 3 e, assim, sucessivamente. Esta nomenclatura é mostrada também na Tabela 4.16.

4.6 Modelagem DCV

De forma geral, quanto aos sistemas de condicionamento de ar, existem basicamente duas classes principais de medidas para reduzir a demanda. Na primeira destas classes está a busca por alternativas aos sistemas de compressão de vapor, onde a refrigeração por absorção figura com grande destaque, já que utiliza formas menos nobres de energia, como rejeitos de calor industrial e energia solar fotovoltaica, para aumentar a pressão do fluido refrigerante.

A segunda classe de medidas engloba a aplicação de técnicas que reduzam o desperdício e melhorem a eficiência energética destes sistemas. Como neste caso as técnicas podem ser aplicadas em edificações novas ou antigas (em projetos de retrofit) e não dependem da disponibilidade de outras formas de energia e nem de alterações profundas nos sistemas existentes, possuem maior aplicabilidade prática em termos de custos e viabilidade técnica. Além disso, podem ser avaliadas por meio de simulações energéticas em ferramentas computacionais, e ter seus resultados analisados antes mesmo de serem aplicados.

Assim, dentro da segunda classe, uma técnica que vem sendo utilizada com êxito para reduzir o consumo de sistemas de ar-condicionado e constitui um dos focos de estudo deste trabalho, é o controle do ar de renovação com base na concentração de CO₂ no ambiente condicionado. O principal objetivo da técnica chamada de Ventilação Sob Demanda – DCV, da sigla em inglês para *Demand Controlled Ventilation*, então, é reduzir o consumo de energia com o condicionamento de ar, nos momentos em que a necessidade de ar externo para renovação diminui. O DCV pode ser baseado na umidade relativa ou na concentração de determinado contaminante no ambiente interno condicionado.

Conforme foi visto na Seção 4.4.3, o dimensionamento dos sistemas de condicionamento de ar é feito com base na taxa de ventilação especificada nas normas para a ocupação máxima. No entanto, em todos os tipos de ambientes normalmente ocupados por pessoas, seja para trabalho, aprendizado, moradia ou entretenimento, a ocupação muda com o

decorrer do tempo. Em um escritório, por exemplo, a ocupação pode cair a praticamente zero no horário de almoço, ou pode flutuar consideravelmente nos demais horários, o que faz parte de um dia de trabalho normal nestes ambientes. Isso ocorre quando determinados colaboradores se ausentam para um café ou atividades recorrentes de suas funções, porém não rigorosamente rotineiras, como reuniões ou trabalhos externos.

Em outros casos, a ocupação do ambiente pode variar bruscamente, passando de zero à sua ocupação máxima, ou vice-versa, em poucos minutos. Este perfil de ocupação é típico, por exemplo, para salas de aula em horários de intervalo ou para auditórios, teatros e cinemas, onde a plateia é liberada apenas minutos antes do início das apresentações, e saem logo após o final. De modo análogo, a ocupação também pode mudar em função do dia da semana ou estação do ano. Neste contexto, a Figura 4.14 mostra a variação da ocupação no ambiente Convivência, enquanto a ventilação permanece constante.

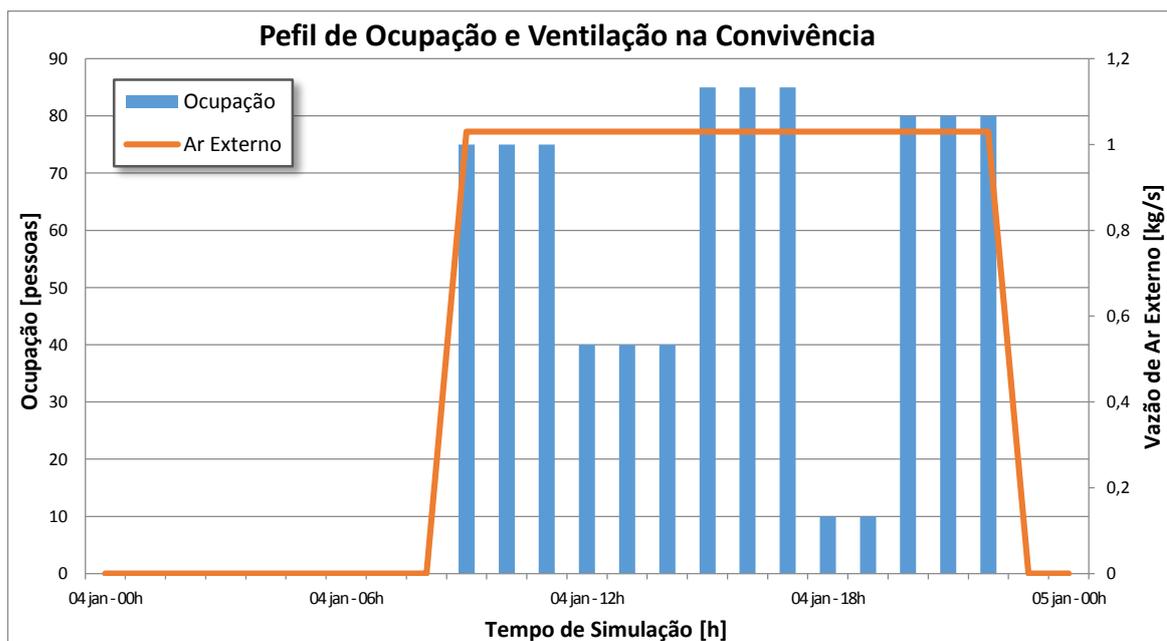


Figura 4.14: Variação da ocupação dos ambientes ao longo do dia.

Porém, na prática, após a instalação do equipamento, a vazão de ar externo de renovação é mantida constante ao longo de todo o ciclo de vida do equipamento e não considera as flutuações na ocupação. Ou seja, os sistemas centrais de ar-condicionado permanecem em funcionamento, fornecendo a vazão mínima de renovação de ar exigido pelas normas ao longo do ano todo, porém com respeito à ocupação máxima dos ambientes. Dessa forma, manter constante a taxa de ar externo de higienização para a ocupação máxima, a despeito das flutuações na ocupação dos ambientes, fatalmente incorrerá em consumo desnecessário de

energia. Pois uma parcela considerável de ar externo, frequentemente quente e úmido, estará sendo condicionado sem necessidade, pelo simples fato da ocupação instantânea do ambiente ser menor que a ocupação de projeto.

Portanto, a estratégia da técnica de Ventilação Sob Demanda, baseada na concentração interna de dióxido de carbono, consiste em modular a vazão de ar externo em função do número de pessoas que efetivamente estiverem no ambiente, fornecendo apenas o ar externo necessário para a ocupação instantânea da sala. Dessa forma, atua-se para diminuir as cargas térmicas externas a que os equipamentos estão submetidos, na porção de suprimento do sistema. Segundo a norma ASHRAE Standard 62.1:2010 (ASHRAE, 2010), existem dois procedimentos para implementar o CO₂-DCV: o Método da Taxa de Ventilação – VRP (sigla em inglês para *Ventilation Rate Procedure*) e o Método da Qualidade do Ar Interior – IAQP (de *Indoor Air Quality Procedure*).

Pelo VRP, o sistema deve estimar a quantidade de pessoas atualmente no ambiente e, aplicar apenas a ventilação de ar externo necessária, baseado nos componentes por área e por ocupante. Dessa forma, a norma NBR 16.401-3:2008/ABNT (2008c) é atendida dinamicamente para a taxa de ar de renovação, levando-se em conta o número de pessoas presentes no ambiente, e não de forma estática, que considera o número máximo de ocupante que o ambiente comporta e que foi utilizado para o dimensionamento do sistema. Para a implementação desse sistema é necessário algum dispositivo para estimar ou contar a quantidade de indivíduos em cada zona térmica.

Pelo IAQP, a ventilação de ar externo é determinada diretamente, em função da qualidade instantânea do ar interno. Através de sensores de CO₂ localizados em cada ambiente condicionado, o sistema modula a vazão exterior para atingir o valor (*setpoint*) de concentração de CO₂ especificado, não dependendo da estimativa indireta do número de ocupantes. Neste procedimento, momentaneamente, a vazão de ar externo mínimo exigido em norma pode não ser atendida, porém tem-se um parâmetro seguro da qualidade do ar interior, que atesta não ser necessária tal vazão, e o conseqüente dispêndio de energia, naquele momento. No caso do IAQP, a manutenção das condições de conforto é mais precisa quando comparado com situação similar de aplicação do VRP.

Uma variação do DCV, incluída na última versão da norma ASHRAE (2010a), é o controle proporcional, onde a vazão de ar externo é modulada de forma proporcional para se atingir os níveis de CO₂ recomendados. Ou seja, se a concentração aumenta rapidamente em função de um salto de ocupação, o controle DCV aumenta a vazão de ar externo e a diminui

gradativamente, conforme a concentração momentânea de CO₂ se aproxima do *setpoint*. Esta e as demais estratégias de controle do DCV apresentadas anteriormente serão avaliadas nas próximas seções.

O principal contaminante de interesse para o DCV é o CO₂ proveniente do metabolismo humano. Apesar de não causar danos à saúde, a concentração de CO₂ está intimamente ligada ao bem estar dos ocupantes de determinado recinto e, conseqüentemente, ao conforto ambiental. A presença dos bioefluentes do metabolismo humano, como odores e gases, juntamente com as variáveis que definem o conforto térmico, por exemplo, temperatura, umidade, etc., impactam diretamente no conforto ambiental e devem ser mantidos dentro de determinadas faixas para propiciar um ambiente sadio e agradável para a maioria das pessoas.

Ao contrário da temperatura e umidade relativa, as normas relacionadas à qualidade do ar interno não especificam uma faixa fixa para a concentração interna absoluta de CO₂, dentro da qual se caracteriza um ambiente completamente saudável. Uma das razões para isso é que a concentração de CO₂ no ar interno depende da concentração externa, que varia de acordo com a localização e características de atividade humana nos arredores, como presença de indústrias ou vias com tráfego intenso de veículos. Além disso, a percepção de odores varia também entre um indivíduo habituado ao ambiente e um visitante, que adentra ao recinto vindo do ambiente externo. Portanto, as normas internacionais fixam apenas uma taxa de ventilação mínima de ar externo que, insuflada ao ambiente interno condicionado, garanta a salubridade e bem estar dos ocupantes e mantenha os gases e odores gerados internamente em níveis aceitáveis.

Porém, para a correta aplicação do DCV-IAQP, então, deve ser definido um limite para a concentração de CO₂ no ambiente interno, que propicie o conforto ambiental para a grande maioria dos ocupantes. Nesse sentido, a norma ASHRAE Standard 62.1:2010 (ASHRAE 2010a) especifica que a concentração interna de CO₂ deve ser mantida cerca de 700 ppm acima da concentração de CO₂ no ar externo, para que o critério de conforto seja satisfeito. Neste trabalho, então, a concentração externa de CO₂ na atmosfera será fixada em 400 ppm, considerado o limite para manter as alterações climáticas causadas por gases de efeito estufa, o aquecimento global, em níveis seguros pelas próximas décadas segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) da ONU, conforme G1 (2013). Portanto, 1.100 ppm de CO₂ é um valor bastante satisfatório.

A Figura 4.15, mostra a concentração interna de CO₂ para o escritório do Departamento de Engenharia da empresa que ocupa o Pavimento 1 do edifício objeto de estudo deste trabalho. O equipamento condicionador de ar que atende este setor do edifício fornece a vazão de renovação de ar especificada pela norma ABNT (2008c), de forma constante ao longo do ano todo, conforme mencionado anteriormente.

Observa-se como a curva de concentração de CO₂, linha cheia azul, acompanha a ocupação instantânea do ambiente, indicada pela linha tracejada preta. Observa-se também que a vazão de renovação recomendada pela norma cumpre sua função e mantém o ambiente sadio durante todo o período de trabalho, com concentração de CO₂ máxima em torno de 1000 ppm. Dessa forma, o nível de CO₂ fica abaixo da faixa de 1.100 ppm definida anteriormente, o que indica potencial de economia de energia.

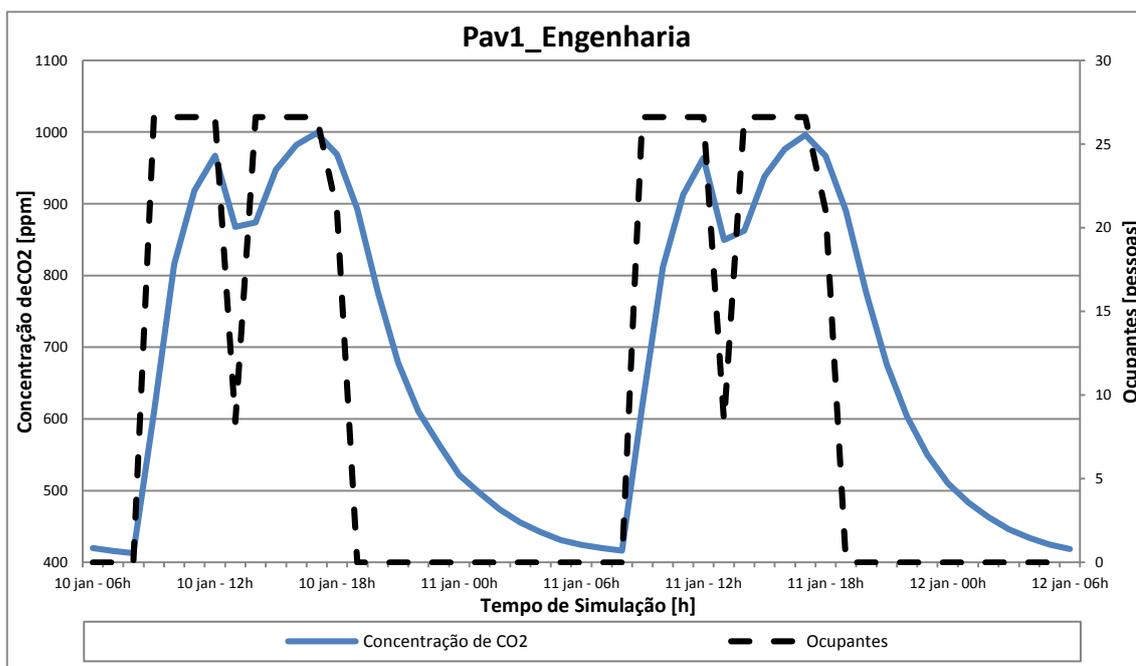


Figura 4.15: Concentração interna de CO₂ para um ambiente de escritórios.

Segundo ASHRAE (2009), o dióxido de carbono pode se tornar perigoso não como um agente tóxico, mas como um simples asfixiante. Quando a concentração de CO₂ excede 35.000 ppm, os receptores respiratórios centrais são acionados e causam sensação de falta de ar. Em concentrações progressivamente maiores, começam a ocorrer disfunções do sistema nervoso central por simples falta de oxigênio. As concentrações de CO₂ em ambientes não industriais ficam, frequentemente, na faixa de 400 ppm a 1200 ppm, dependendo da densidade de ocupação, quantidade e eficácia da ventilação.

4.7 Casos de Estudo

Após simular o modelo completo pela primeira vez, com os sistemas de condicionamento de ar de interesse definidos e corretamente dimensionados, obtém-se o Modelo Final, a partir do qual serão definidos os casos de estudo.

São definidos, então, seis casos para análise de diferentes estratégias de projeto quanto ao ar externo de renovação, mantendo constante a capacidade de refrigeração e as vazões de insuflação e ar externo calculadas pelo EnergyPlus para o Modelo Final. Estes casos, identificados como Modelo 0 a Modelo 5, são detalhados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Casos de estudo.

Id	Caso	Estratégia	Fonte
M0	Modelo 0	100% de ar externo	A título de comparação
M1	Modelo 1	Componente por pessoa e por área, Caso Base	NBR 16401-3:2008 ABNT (2008c)
M2	Modelo 2	DCV-VRP	Standard 62.1:2010 ASHRAE (2010a)
M3	Modelo 3	DCV-IAQP com 700 ppm de CO ₂	Standard 62.1:2010 ASHRAE (2010a)
M4	Modelo 4	DCV-IAQP com 1.100 ppm de CO ₂	Standard 62.1:2010 ASHRAE (2010a)
M5	Modelo 5	DCV-IAQP com 1.100 ppm de CO ₂ com controle proporcional	Standard 62.1:2010 ASHRAE (2010a)

Os Modelos serão sempre identificados por uma cor, quando forem apresentados os gráficos com os resultados das simulações. São elas: Azul para o Modelo M0, Preto para o Modelo M1, Verde para o Modelo M2, Vermelho para o Modelo M3, Laranja para o Modelo M4 e Roxo para o Modelo M5. Os resultados e as discussões sobre os Modelos serão apresentados no Capítulo 5.

4.8 Fluxograma da Metodologia Desenvolvida

De forma a melhor visualizar as etapas principais da metodologia desenvolvida neste trabalho, a Figura 4.16 mostra um fluxograma dos passos seguidos, com as etapas principais da modelagem da edificação e da simulação dos casos de estudo.

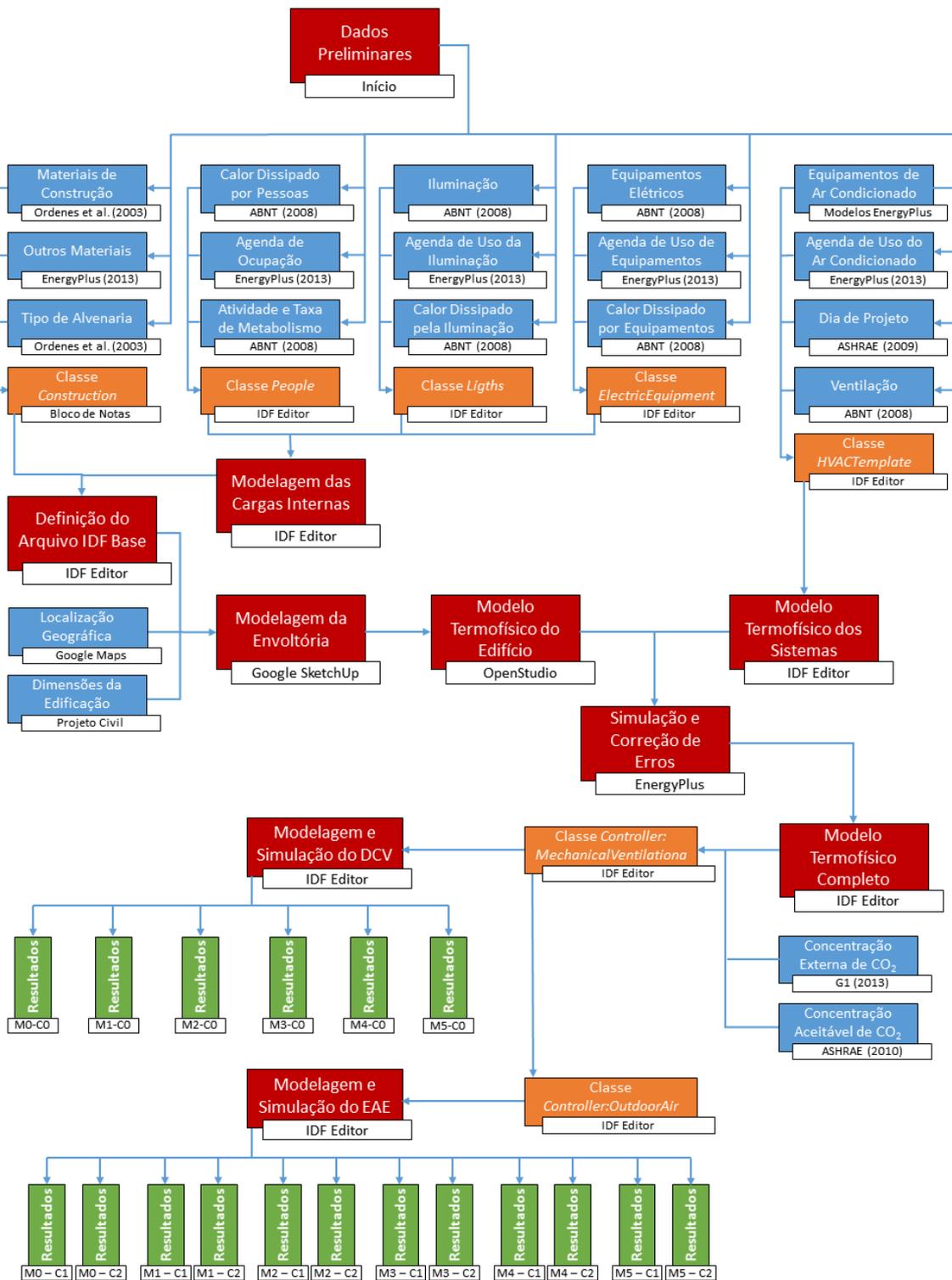


Figura 4.16: Fluxograma da metodologia utilizada para a modelagem e simulação dos casos estudados.

Na Figura 4.16, os blocos Azuis representam os dados de entrada, com suas respectivas fontes, enquanto os blocos Laranjas representam objetos do EnergyPlus, os Vermelhos representam os programas utilizados para entrada de dados ou modelagem e, finalmente, os blocos Verdes representam as saídas, com os resultados de cada Modelo ou Caso.

CAPÍTULO 5

5. Análise de Resultados

A partir das premissas de projeto e metodologias de modelagem apresentadas no Capítulo 4, e após efetuar as simulações para cada caso, todos os resultados serão apresentados e analisados neste Capítulo. Para melhor interpretar os resultados, apresenta-se novamente a Tabela 4.17, que mostra as estratégias de controle do ar externo com base no DCV, identificadas pelos casos denominados Modelos 0 a Modelo 5.

Assim, serão estudadas as influências que cada uma dessas estratégias impõe no consumo de energia, nas condições internas e, conseqüentemente, no conforto dos ocupantes. A Tabela 5.1 reproduz a Tabela 4.17.

Tabela 5.1: Casos de estudo.

Id	Caso	Estratégia	Fonte
M0	Modelo 0	100% de ar externo	A título de comparação
M1	Modelo 1	Componente por pessoa e por área, Caso Base	NBR 16401-3:2008 ABNT (2008c)
M2	Modelo 2	DCV-VRP	Standard 62.1:2010 ASHRAE (2010a)
M3	Modelo 3	DCV-IAQP com 700 ppm de CO ₂	Standard 62.1:2010 ASHRAE (2010a)
M4	Modelo 4	DCV-IAQP com 1.100 ppm de CO ₂	Standard 62.1:2010 ASHRAE (2010a)
M5	Modelo 5	DCV-IAQP com 1.100 ppm de CO ₂ com controle proporcional	Standard 62.1:2010 ASHRAE (2010a)

Dentro de cada um desses Modelos, estão os sistemas que foram definidos na Seção 4.5, e que atendem cada ambiente da edificação em questão. Os sistemas, assim como a nomenclatura utilizada para identificar cada um deles, foi apresentada na Tabela 4.16, que é reproduzida como Tabela 5.2.

Nas análises, serão utilizados alguns dias como exemplo, selecionados a partir dos resultados gerados, de forma a ilustrar os efeitos que tiveram impacto no consumo de energia anual. Esses dias não são, necessariamente, dias de projeto ou outros dias especiais (típicos).

Tabela 5.2: Condicionadores Autônomos Compactos, ambientes atendidos e capacidades.

Sistema	Ambientes Atendidos	Capacidade
AC-PT/S1	Recepção Corredor Sala 1 Sala 2	16,9 kW (4,8 TR) 3.384 m ³ /h
AC-PT/S2	Convivência	23,2 kW (6,6 TR) 3.389 m ³ /h
AC-P1/S1	Recepção Reunião Gerência Manutenção	19,6 kW (5,6 TR) 4.104 m ³ /h
AC-P1/S2	Engenharia TI	26,2 kW (7,5 TR) 5.436 m ³ /s
AC-P1/S3	Auditório	15,6 kW (4,5 TR) 2.531 m ³ /h
AC-P2/S1	Bloco 1 Bloco 2 - Recepção Bloco 2 - Operacional Bloco 2 - Reunião	30,1 kW (8,6 TR) 6.408m ³ /s
AC-P2/S2	Bloco 3 Bloco 4 Bloco 5 Bloco 6	26,0 kW (7.4 TR) 5.508 m ³ /h
AC-P3/S1	Cobertura 1	13,3 kW (3,9 TR) 2.769 m ³ /h
AC-P3/S2	Cobertura 2	14,6 kW (4,2 TR) 2.823 m ³ /h

5.1 Condições de Conforto com DCV

5.1.1 Temperatura Interna

Para o estudo em questão, a temperatura interna, na qual devem ser mantidos todos os ambientes, foi selecionada conforme as recomendações de ABNT (2008b), que fixa a faixa de conforto entre 23°C e 25°C. Assim, para todas as simulações, o *setpoint* de temperatura dos sistemas de condicionamento de ar foi fixado em 24°C e a umidade relativa em 50%.

Normalmente, em sistemas centrais, o equipamento condicionador de ar é instalado em uma casa de máquinas, que recebe o ar proveniente dos plenums de retorno no entreferro dos ambientes. Esta casa de máquinas, por sua vez, atua como um plenum de retorno a nível de sistema onde, usualmente, instala-se o termostato da máquina, utilizando a temperatura do ar de retorno para o controle do equipamento.

No modelo *UnitarySystem*, utilizado neste trabalho, conforme EnergyPlus (2013b), pode-se utilizar a opção do retorno a plenum, porém o termostato deve estar obrigatoriamente em um ambiente condicionado, ou seja, dotado de um terminal do sistema condicionador central, definida como a zona de controle do sistema (*ControlZone*). Portanto, não é possível posicionar o termostato da máquina no retorno do sistema, como ocorre usualmente na prática.

Dessa forma, conforme mostra a Tabela 5.2, vários sistemas simulados atendem mais de um ambiente. Assim, em cada um desses sistema foi definida uma sala de controle, e como não se considerou sistemas dotados de controle de vazão de insuflação (VAV), para melhor avaliação do impacto do DCV, o controle de temperatura nos sistemas que atendem múltiplos ambientes, é feito a partir dessa sala de controle, onde se localiza o termostato.

Conforme mostrado em seguida, em um mesmo sistema, a temperatura ficou estável nas salas de controle, enquanto nos demais ambientes ocorreram pequenas flutuações, conforme o sistema buscou atingir a temperatura de conforto especificada pelo termostato. Porém, mesmo se o controle da temperatura fosse feito pelo ar de retorno, ainda existiriam flutuações pois cada ambiente possui características físicas diferentes, que influenciam diretamente na temperatura. Portanto, o termostato no retorno não garante menores distorções na temperatura de ambientes condicionados por um mesmo sistema.

A Figura 5.1 mostra a variação da temperatura nos ambientes atendidos pelo Sistema AC-P1/S1, para todos os Modelos da Tabela 5.1, conforme a vazão de ar externo foi variada pela estratégia de controle utilizada em cada Modelo. Na sequência, a Figura 5.2 mostra as variações das vazões mássicas de ar externo para cada Modelo, para o mesmo sistema AC-P1/S1 e para o mesmo tempo de simulação da Figura 5.1. Nesta figura, pode-se observar as flutuações de temperatura mencionadas anteriormente, em torno da temperatura especificada de 24°C, para os ambientes Reunião, Gerência e Manutenção. Neste caso, o termostato localiza-se na Recepção, que apresentou temperaturas uniformes durante todo o período simulado.

Neste sistema, o ambiente Manutenção apresentou temperaturas mais elevadas, tanto nos momentos em que os sistemas estão em operação, como quando estão desativados, durante a noite. Apesar de estar no mesmo zoneamento térmico, este ambiente recebe mais radiação solar direta que os demais, nesta época do ano, além de possuir uma área menor. Assim, a energia solar tem maior influência na temperatura interna. Porém, durante os períodos ocupados, a temperatura nesta zona ficou entre 23 °C e 25 °C, dentro, portanto, da faixa de conforto estipulada por ABNT (2008b).

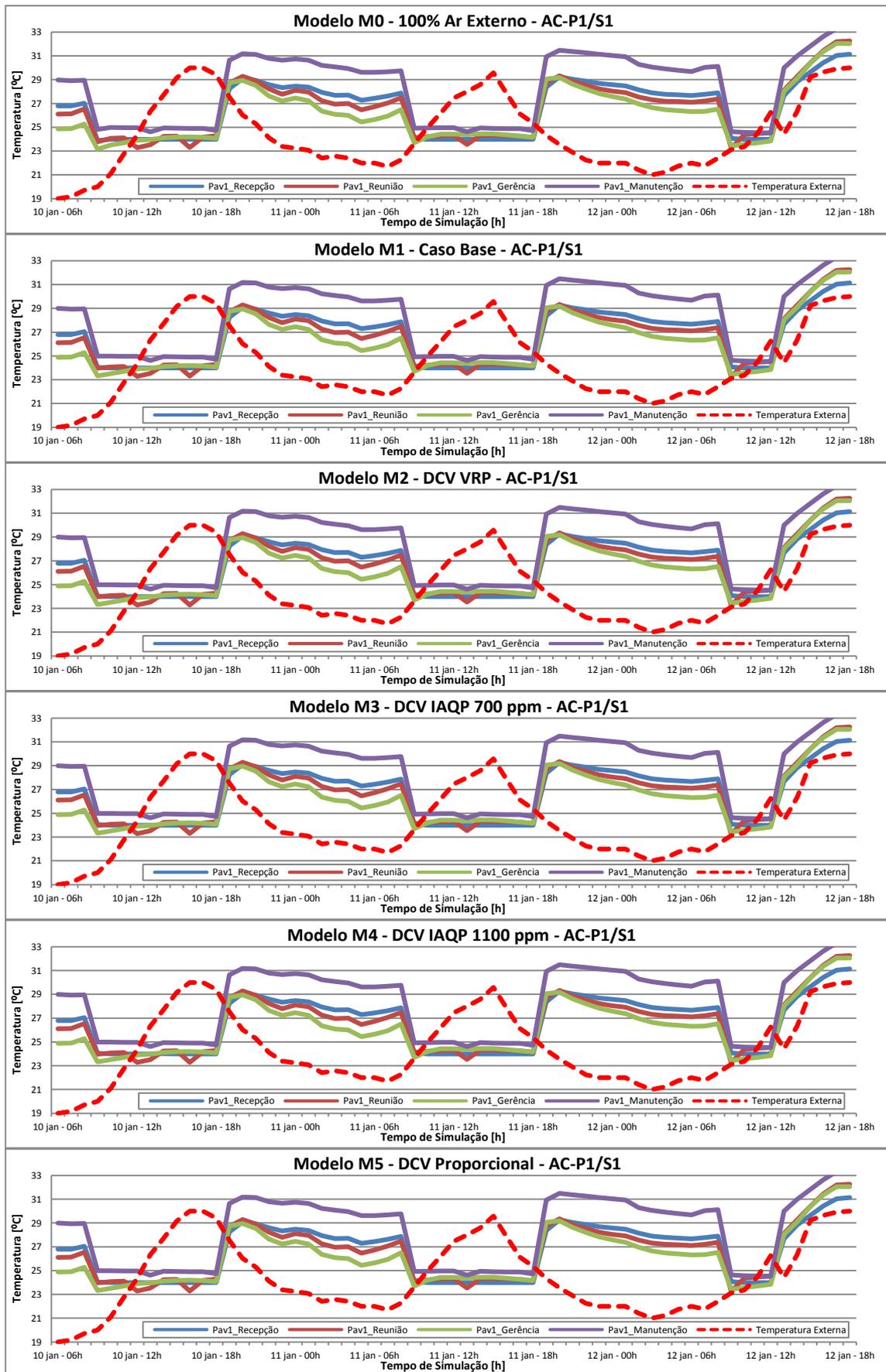


Figura 5.1: Temperatura interna para os ambientes do sistema AC-P1/S1.

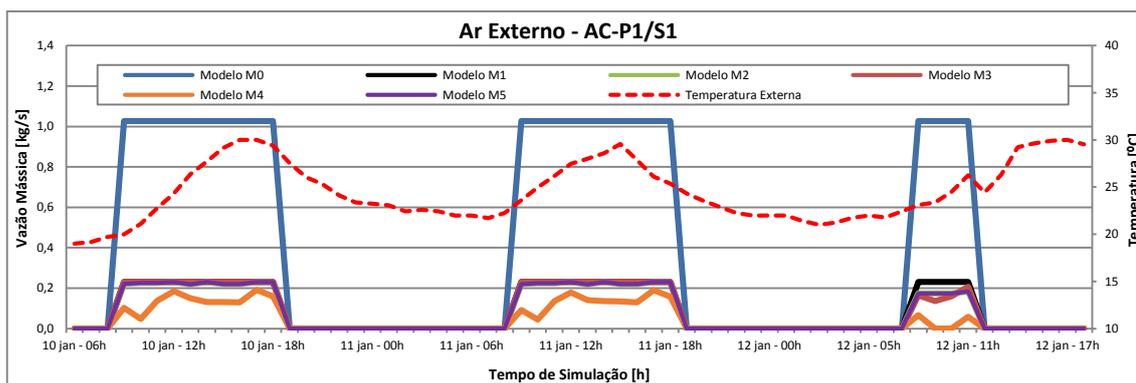


Figura 5.2: Vazão de ar externo e temperatura externa para o equipamento AC-P1/S1.

É importante ressaltar que as flutuações de temperatura ocorreram sempre dentro de um mesmo Modelo, ou estratégia de controle do ar externo, e não houve mudanças consideráveis no comportamento da temperatura com a aplicação do DCV com relação ao Modelo M1, Caso Base. Apenas o ar totalmente renovado do Modelo M0 causou pequenas diferenças, onde ocorreu leve queda na temperatura interna no início da manhã, devido à insuflação de uma vazão maior de ar externo fresco. Observa-se pela Figura 5.2, que no dia 10 de Janeiro, a temperatura externa está abaixo dos 20 °C às 8 horas da manhã, quando o sistema é acionado

Assim, no Modelo M0, o equipamento condicionador de ar permanece em carga parcial baixa ou, até mesmo em modo ventilação, pois a carga térmica a remover na serpentina ou é pequena ou é nula. E o calor proveniente do ar de retorno, que nos outros Modelos ajuda a elevar a temperatura interna e melhorar as condições de conforto, é expurgado para o ambiente externo. Esta condição se agrava nos meses frios e, um sistema que fornece 100% de ar externo pode reduzir o consumo de energia, mas não controlaria as condições de conforto nos ambientes atendidos.

Nos ambientes de sistemas com ambiente único, a temperatura apresentou comportamentos similares às salas de controle dos sistemas que atendem múltiplos ambientes. A Figura 5.3 mostra as temperaturas internas da zona térmica Convivência, atendida exclusivamente pelo sistema AC-PT/S2, para os diversos modelos da Tabela 5.1.

Ainda, para ilustrar melhor o efeito causado pela variação da vazão de ar externo sobre a temperatura interna, a Figura 5.4 mostra as variações na vazão mássica de ar externo proporcionadas pelo controle DCV.

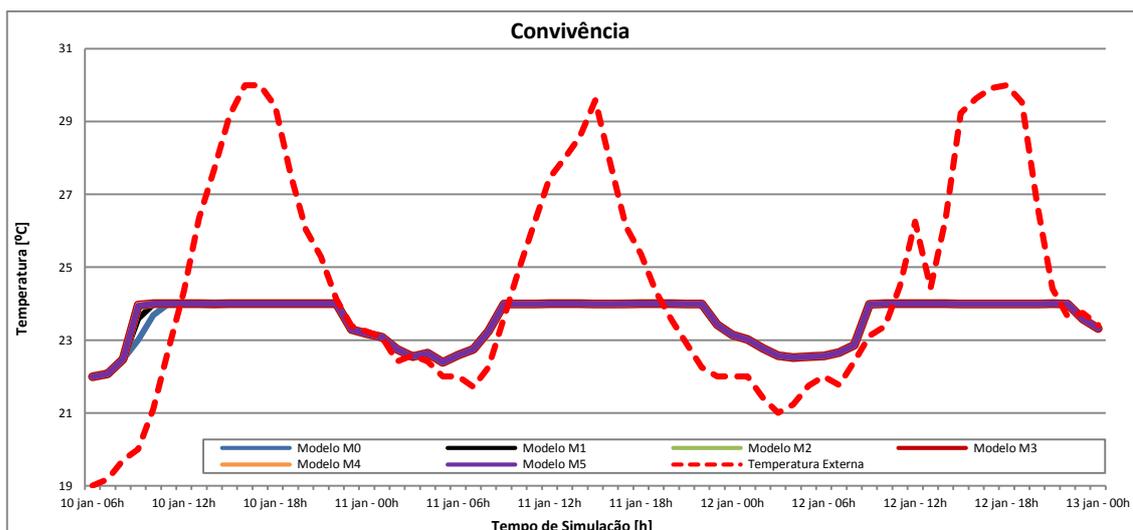


Figura 5.3: Temperatura interna para a Convivência, no sistema AC-PT/S2.

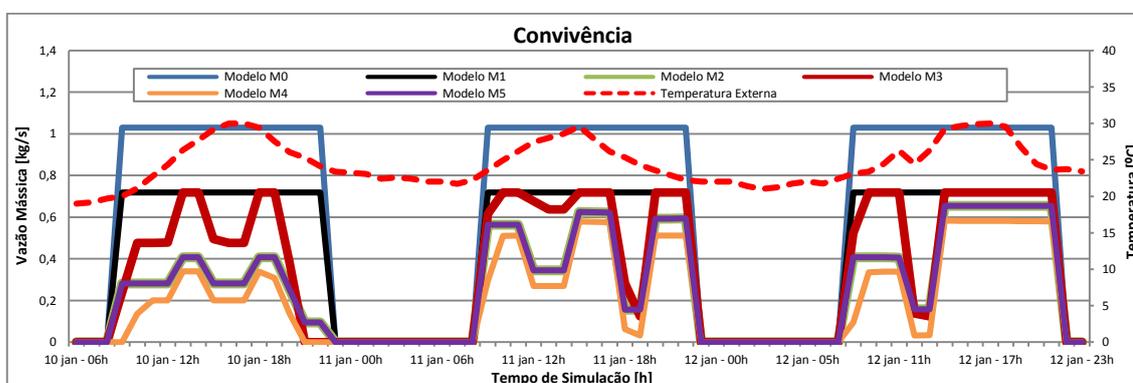


Figura 5.4: Vazão mássica de ar externo para a Convivência, no sistema AC-PT/S2.

Observa-se que todos os Modelos dotados de controle DCV apresentam comportamentos bastante similares para a temperatura interna, onde as curvas referentes à M2, M3, M4 e M5 praticamente se sobrepõem no gráfico da Figura 5.3. Observa-se ainda, que todos os Modelos com DCV atingiram mais rapidamente a temperatura de 24°C que os Modelos M1 e M0, no dia 10 de janeiro.

Portanto, considerando a variação da vazão de ar externo mostrada na Figura 5.4 e considerando que no início do dia a temperatura externa está abaixo de 24 °C, (19,7 °C às 8:00 horas da manhã de 10 de janeiro, pela Figura 5.3), uma menor vazão de ar externo, como a aplicada nos Modelos com DCV, faz com que o calor gerado internamente nos ambientes seja recirculado no sistema pela vazão de ar de retorno, ajudando a temperatura interna a subir mais rapidamente nos sistemas dotados de DCV. Assim, conforme se aumenta a vazão de ar externo, a temperatura interna sobe mais lentamente pela ação do ar externo, conforme se nota pela curva preta do Modelo M1 e pela curva azul do Modelo M0, no início do período de funcionamento do dia 10 de janeiro.

Por outro lado, apesar da diferença no *setpoint* da concentração de CO₂, para os modelos dotados de DCV-IAQP, as curvas de temperatura para os Modelos M3 e M4 ficaram praticamente iguais aos demais Modelos com DCV. Assim, as estratégias de controle do ar externo baseadas no DCV têm pouca influência na temperatura interna.

Ainda, como se observou, o último Modelo a atingir a temperatura especificada foi o Modelo M0, no qual se utiliza 100% de ar externo, e na Seção 5.2, onde serão apresentadas as análises do consumo de energia de cada um dos modelos, será mostrado como tal fenômeno impacta no funcionamento do compressor, no consumo de energia e nas cargas térmicas sobre a serpentina de resfriamento e desumidificação (SRD).

De forma similar, a Figura 5.5 mostra as temperaturas internas no ambiente Auditório, que é atendido exclusivamente pelo sistema AC-P1/S3, para os diversos modelos da Tabela 5.1. Observa-se que neste caso, todos os Modelos apresentados tiveram comportamentos praticamente idênticos para a temperatura interna. Como o Auditório recebe sol no início do dia, observa-se que sua temperatura antes das 8 horas da manhã, momento de acionamento dos sistemas, ficou acima de 24 °C (26,7 °C para todos os Modelos), mesmo estando a temperatura externa em 19,7 °C. Portanto, o efeito mencionado anteriormente não ocorre neste sistema e todos os Modelos atingem simultaneamente o *setpoint* de temperatura. Para os mesmos momentos da Figura 5.5, a Figura 5.6 mostra as vazões mássicas de ar externo para o Auditório, no sistema AC-P1/S3. Ainda da Figura 5.5, observa-se que durante todo o período em que os sistemas não estavam em funcionamento, a temperatura no Auditório ficou acima de 24 °C, o que não ocorreu na Convivência, onde a temperatura ficou sempre abaixo deste valor, para os mesmos dias do ano.

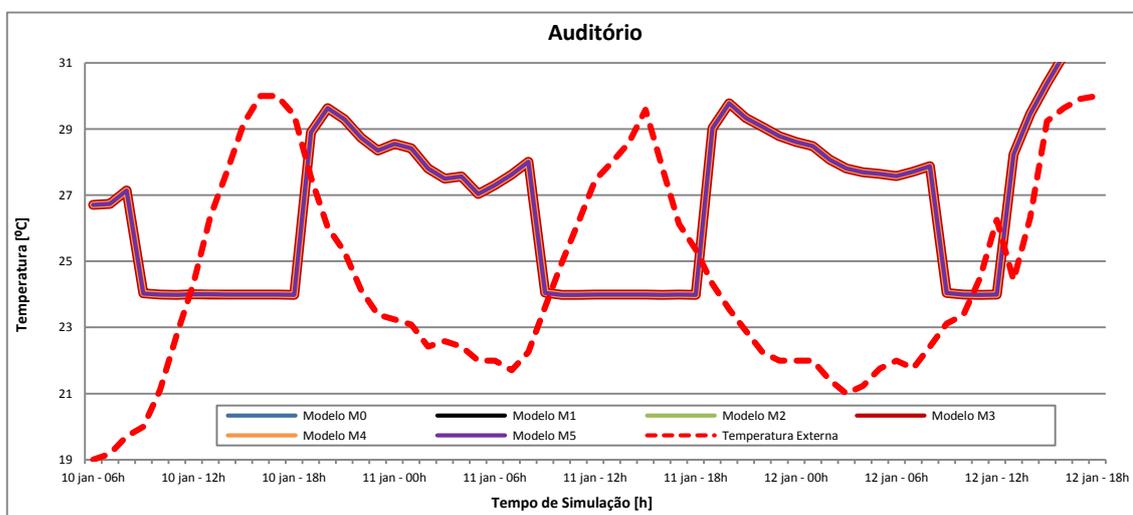


Figura 5.5: Temperatura interna para o Auditório, no sistema AC-P1/S3.

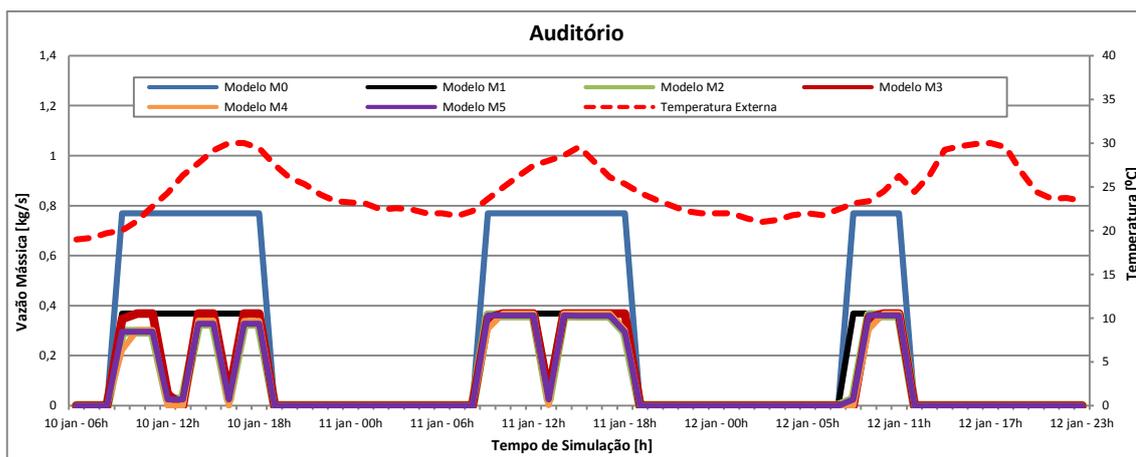


Figura 5.6: Vazão mássica de ar externo para o Auditório, no sistema AC-P1/S3.

Em primeiro lugar, isso decorre do fato de a Convivência possuir um volume muito maior que o Auditório e, em segundo lugar, de receber relativamente pouca radiação solar nesta época do ano, devido à orientação de suas fachadas. Assim, apesar de ter uma área envidraçada muito maior que o Auditório, a energia solar recebida durante o dia tem um efeito pequeno na temperatura interna da Convivência. Por outro lado, o Auditório recebeu energia solar durante todo o dia, que foi armazenada pela estrutura de alvenaria e irradiada ao ambiente, mantendo sua temperatura alta inclusive durante a noite, devido ao seu volume reduzido. Estes detalhes são bastante interessantes, também, por evidenciar as inúmeras variáveis a que os sistemas de condicionamento de ar e as condições de conforto nos ambientes, estão sujeitas.

Ainda devido a essas variáveis, conforme dito anteriormente, o controle termostático feito pelo retorno do sistema não garante temperatura uniforme em vários ambientes atendidos pelo mesmo sistema.

5.1.2 Umidade Relativa Interna

Dos sistemas de condicionamento de ar considerados nas simulações em questão, nenhum deles possui controle direto da umidade relativa interna. No projeto dos sistemas foi considerada uma umidade relativa interna de 50%, também segundo recomendações de ABNT (2008b). Dessa forma, além das condições externas, a vazão de ar externo em si irá influenciar na umidade relativa interna.

Assim como na Seção anterior, para facilitar a visualização do efeito das técnicas de controle do ar externo representadas pelos Modelos da Tabela 5.1, a Figura 5.7 traz as condições internas nos ambientes atendidos pelo Sistema AC-P1/S1, enquanto a Figura 5.8 traz a vazão mássica de ar externo e a umidade relativa externa.

Conforme mostra a Figura 5.7, para o Modelo M0 que utiliza 100% de ar externo, a umidade relativa interna ficou alta durante todo o período de funcionamento do sistema, entre 60% e 70%, e caiu nos momentos em que os sistemas foram desativados. Isso ocorre devido à alta umidade relativa externa mostrada na Figura 5.8.

Para o Modelo M1, caso base, que utilizou as vazões de renovação de ar recomendadas em norma, a umidade teve queda gradual ao longo do dia, de 60% para 50%, durante o período de funcionamento dos equipamentos. O Modelo M3 teve comportamento bastante semelhante ao M1, devido ao fato de usar a sua taxa máxima de ar externo (que é igual à de M1), praticamente durante todo o dia, na tentativa de atingir o nível especificado de 700 ppm para a concentração interna de CO₂.

Os Modelos M2 e M5 apresentaram comportamentos bastante parecidos, com a umidade relativa caindo de 60% para 50% durante a manhã e, oscilando em torno de 50% ao longo da tarde, com as variações de ar externo provocadas pela flutuação na ocupação.

Finalmente, o Modelo M4 apresentou os menores valores de umidade relativa, ficando já no início da manhã abaixo de 55%, quando a umidade relativa externa estava alta, se mantendo em torno de 50% durante todo o dia, oscilando com as flutuações de ocupação e variações na vazão de ar externo. Dessa forma, com uma baixa vazão de ar externo, o equipamento condicionador tem uma melhor influência no controle da umidade ambiente e na manutenção das condições de conforto dentro dos padrões de norma.

De forma geral, a Figura 5.7 mostra que a umidade relativa interna cai conforme se reduz a vazão de ar externo. Nestas condições, a serpentina de resfriamento e desumidificação retira continuamente a umidade do ar de retorno, em taxa maior que a soma da taxa de umidade gerada internamente pelo metabolismo das pessoas com a taxa de umidade inserida no sistema pelo ar externo. Portanto, o DCV permite um melhor controle da umidade relativa através da modulação do ar externo. Por outro lado, em climas mais secos, o DCV poderia provocar desumidificação excessiva no ar ambiente, sendo necessário utilizar algum tipo de sistema umidificador.

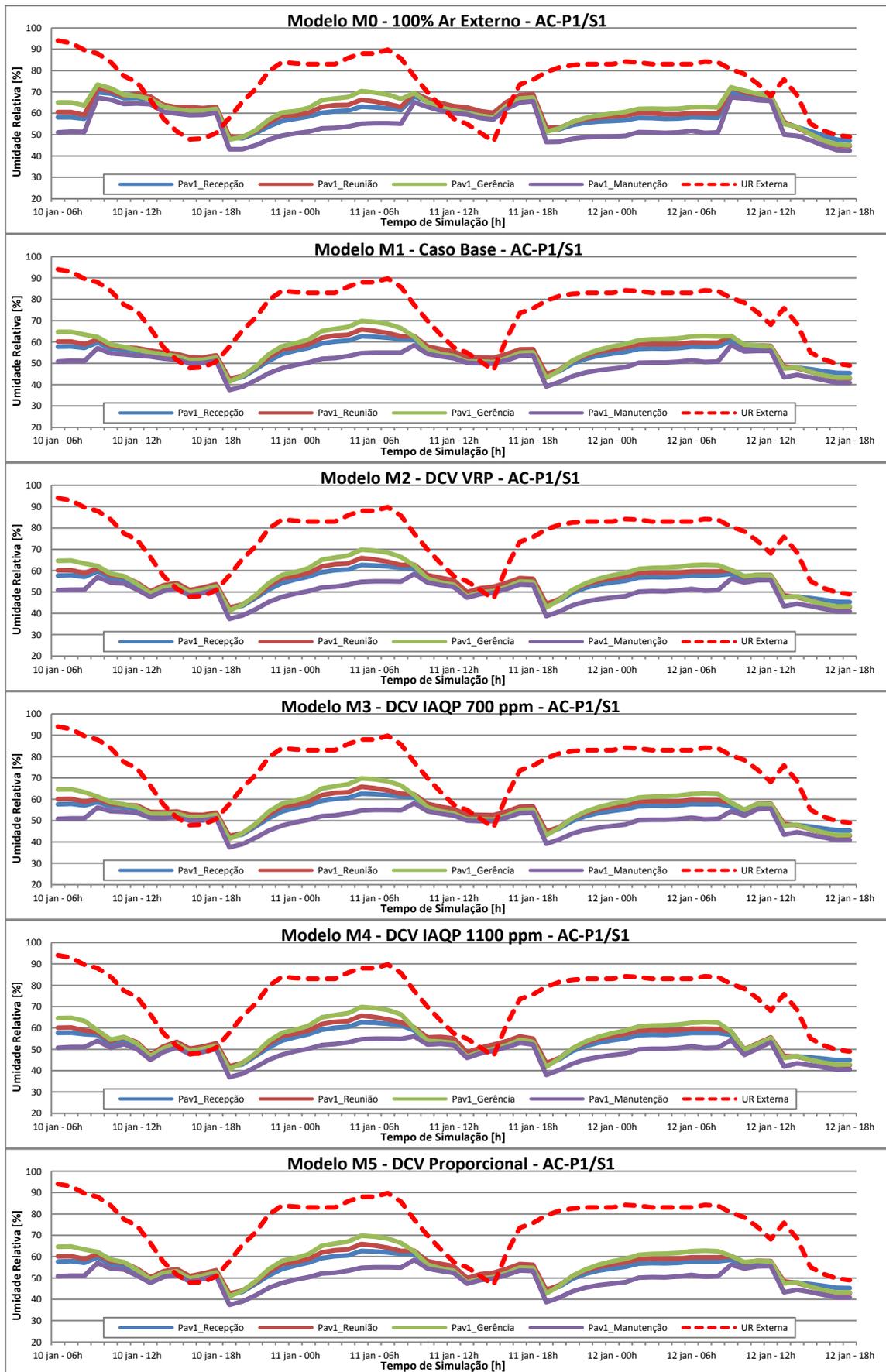


Figura 5.7: Umidade relativa interna para as zonas térmicas do sistema AC-P1/S1.

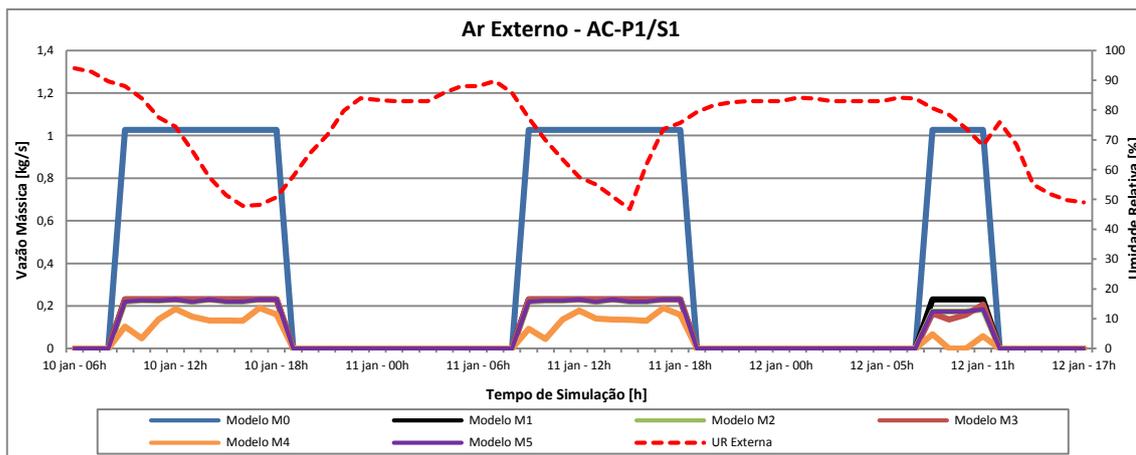


Figura 5.8: Vazão de ar externo e umidade relativa externa para o equipamento AC-P1/S1.

Para a Convivência, conforme mostra a Figura 5.9, houve variação considerável na umidade relativa de um Modelo para outro. Porém, mais uma vez pode-se observar que a umidade relativa interna é menor para o Modelo M4, que utiliza uma menor taxa de ar externo para renovação, devido ao controle DCV-IAQP configurado em 1.100 ppm para a concentração de CO₂. Ainda, os Modelos com DCV apresentaram uma queda na umidade relativa no início da manhã, devido ao fato de a concentração interna de CO₂ estar baixa, permitindo aos controladores, reduzir a vazão de ar externo.

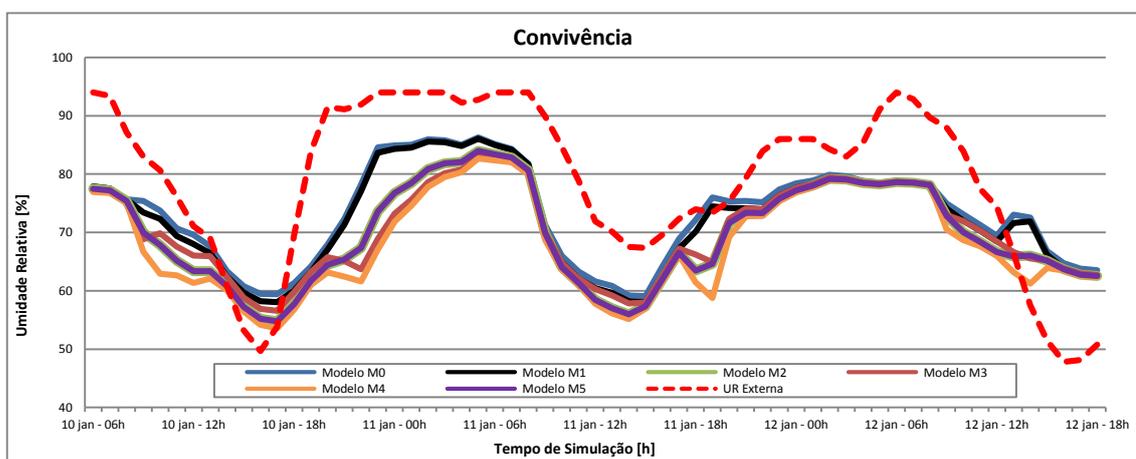


Figura 5.9: Umidade relativa interna para a Convivência, no sistema AC-PT/S2.

Finalmente, para o Auditório, a umidade relativa interna oscilou bastante, conforme mostra a Figura 5.10. Observa-se que tal oscilação ocorreu mais intensamente nos modelos dotados de controle DCV. Isso ocorre porque existe grande flutuação na ocupação do auditório e, conseqüentemente, na geração interna de umidade e de CO₂, o que faz com que a taxa de ar externo se altere continuamente para se atingir as condições de conforto no interior da zona térmica. Observa-se também uma brusca queda na umidade relativa, sempre em torno das 12

horas nos Modelos com DCV, devido à baixa ocupação na hora do almoço. Portanto, mais uma vez se observa que, com a redução da taxa de ar externo, a umidade relativa interna também é reduzida.

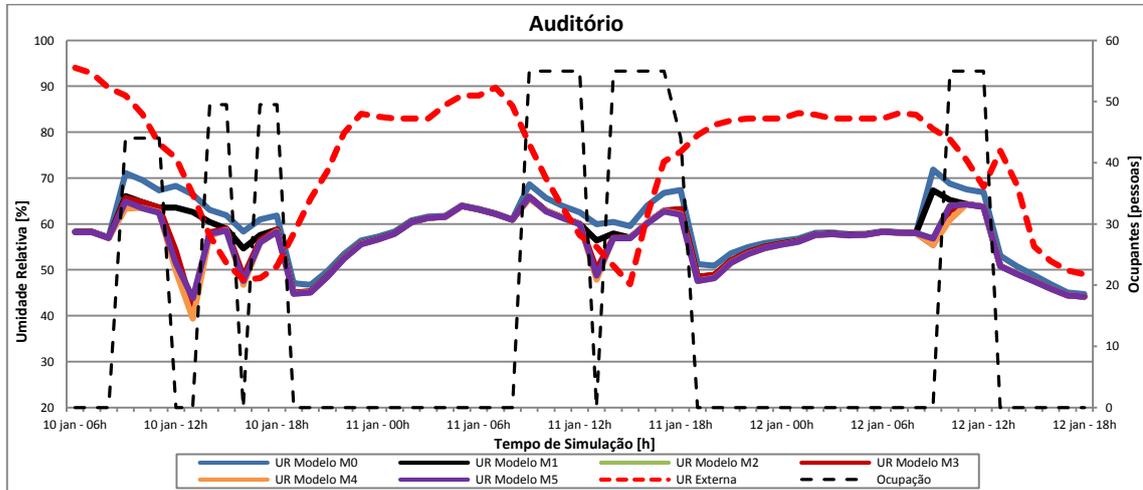


Figura 5.10: Umidade relativa interna para o Pav1 – Auditório, no sistema AC-P1/S3.

Pelas figuras anteriores, como os Modelos com controle DCV, e principalmente o Modelo M4, proporcionaram uma menor umidade relativa interna, provavelmente ocorreu um maior consumo de energia nestes momentos, devido à maior carga latente removida na SRD. Conforme será visto na sequência, esta observação mostra-se verdadeira para a maior parte do ano, com consumo maior de energia no Modelo M4 que nos demais.

5.1.3 Concentração Interna de CO₂

As concentrações internas de CO₂ mudam bastante com a estratégia de controle do ar externo utilizada. A Figura 5.11 mostra vazão mássica de ar externo para os modelos da Tabela 5.1 e a concentração de CO₂ no ar exterior para melhor comparação com as próximas figuras. Para as salas do sistema AC-P1/S1, conforme mostra a Figura 5.12, os Modelos M2 e M5 causaram uma concentração maior que a do Modelo M1, caso base, porém dentro da faixa aceitável de 1.100 ppm, o que indica potencial adicional de redução do ar externo. Tal fato também ocorreu para as salas do AC-P1/S2 e AC-P1/S3, conforme mostra a Figura 5.13 e a Figura 5.14, respectivamente.

Para o Modelo M2, com controle DCV-VRP, não existe valor algum de *setpoint* para a concentração de CO₂ do ar interno, além do número de pessoas no recinto que determina

instantaneamente a vazão de ar externo. Neste caso, o EnergyPlus obtém o número de pessoas no ambiente para o atual incremento de tempo da simulação, diretamente da agenda de ocupação do ambiente (objeto *Schedule:Compact*). Na prática, o número de pessoas é estimado com sensores de presença ou com um perfil pré-programado da ocupação, que certamente poderá levar a erros na gestão da taxa de ventilação. Tanto na simulação como na prática, a técnica aplica a taxa de ar externo de norma para esta condição atual de ocupação. E como o sistema de controle não é realimentado com informações sobre a efetividade da taxa de ventilação aplicada no momento, continua-se com o ambiente sobreventilado, mesmo com a aplicação do DCV. Portanto, de início se nota que o DCV-VRP cumpre seu objetivo de redução da ventilação desnecessária do ambiente, porém ainda deixa margem para reduções adicionais.

Quanto ao Modelo M5, os resultados foram praticamente idênticos aos do Modelo M2, conforme ocorreu para a temperatura e umidade relativa internas. Dessa forma, o sistema com controle DCV Proporcional tem comportamento bastante parecido com o controle DCV-VRP do Modelo M2, provavelmente devido às diferenças de resposta das variáveis monitoras com relação ao sistema de controle utilizado.

Para o Modelo M3, observando-se mais detalhadamente o comportamento da concentração de CO₂ na Figura 5.12, na Figura 5.13 e na Figura 5.14, conclui-se que, de forma geral, os sistemas não são capazes de manter o *setpoint* de 700 ppm nos momentos de pico de ocupação, pois o sistema não foi dimensionado para a vazão de ar externo necessária à manutenção da concentração em um nível tão baixo. Do contrário, a concentração mínima fica limitada ao M1, pois todos os modelos possuem o mesmo valor de ar externo máximo, com exceção do M0.

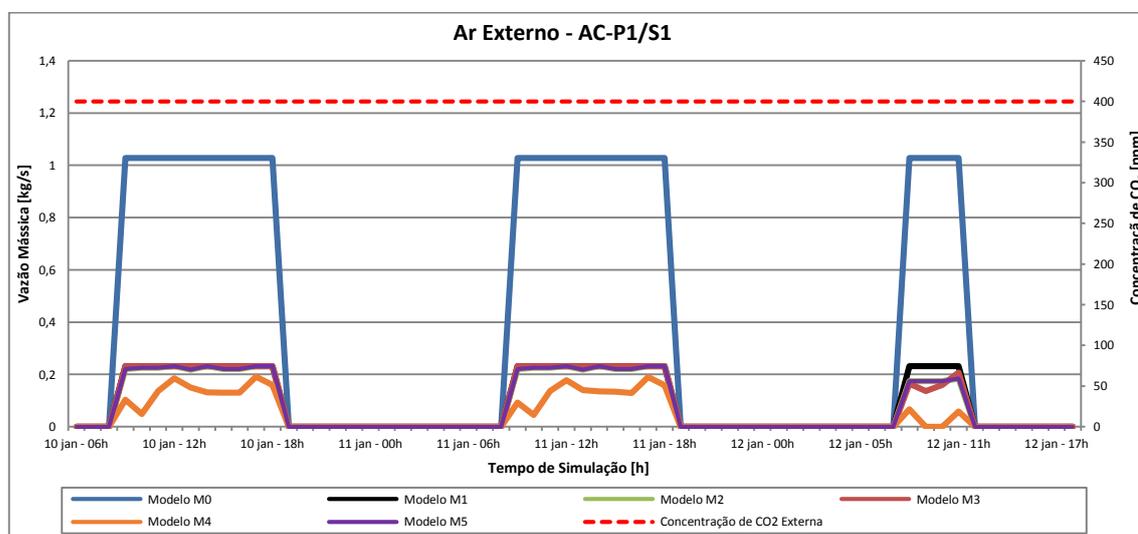


Figura 5.11: Vazão de ar externo e concentração de CO₂ externa para o equipamento AC-P1/S1.

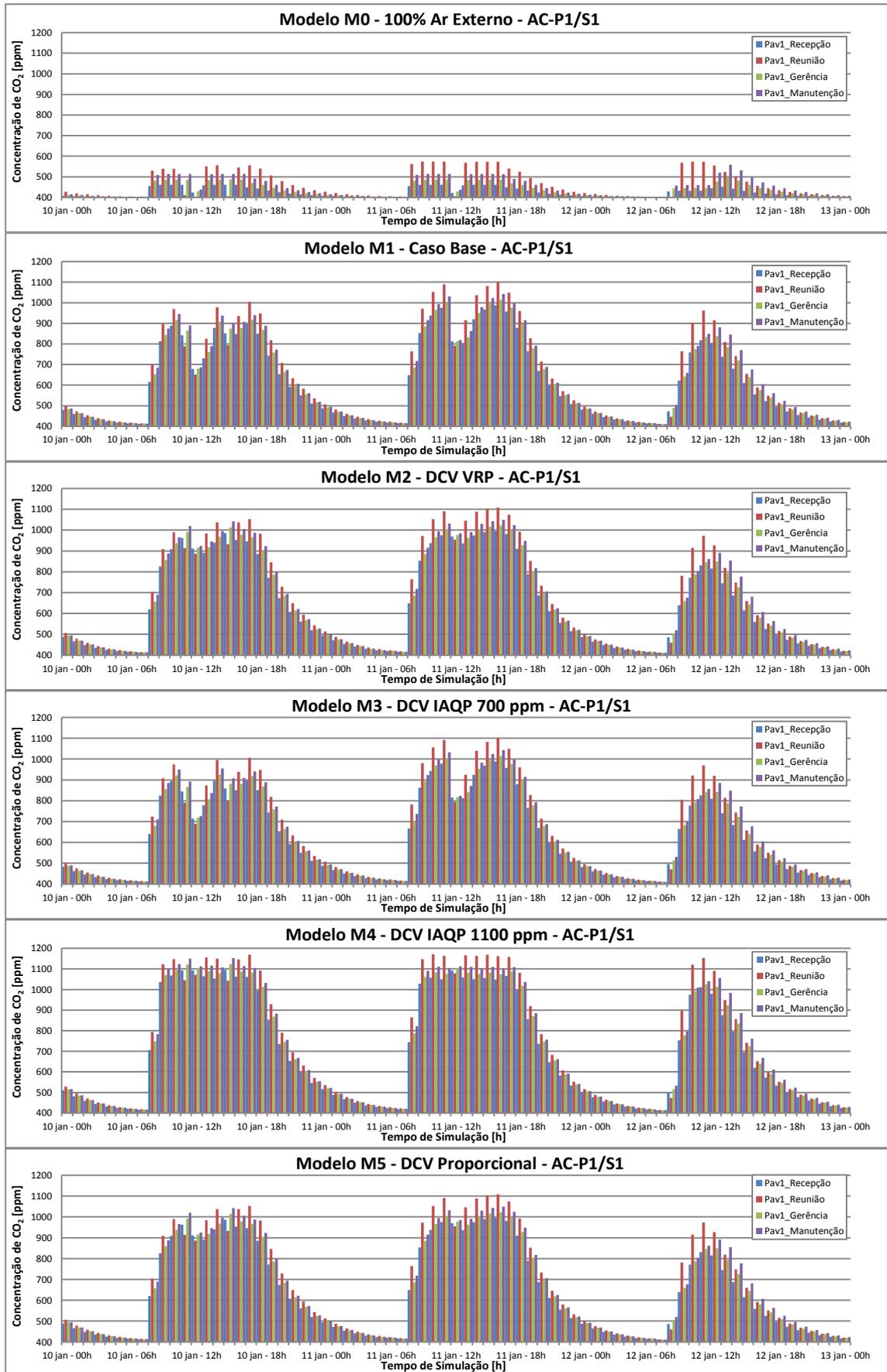


Figura 5.12: Concentração de CO₂ para as zonas térmicas do sistema AC-P1/S1.

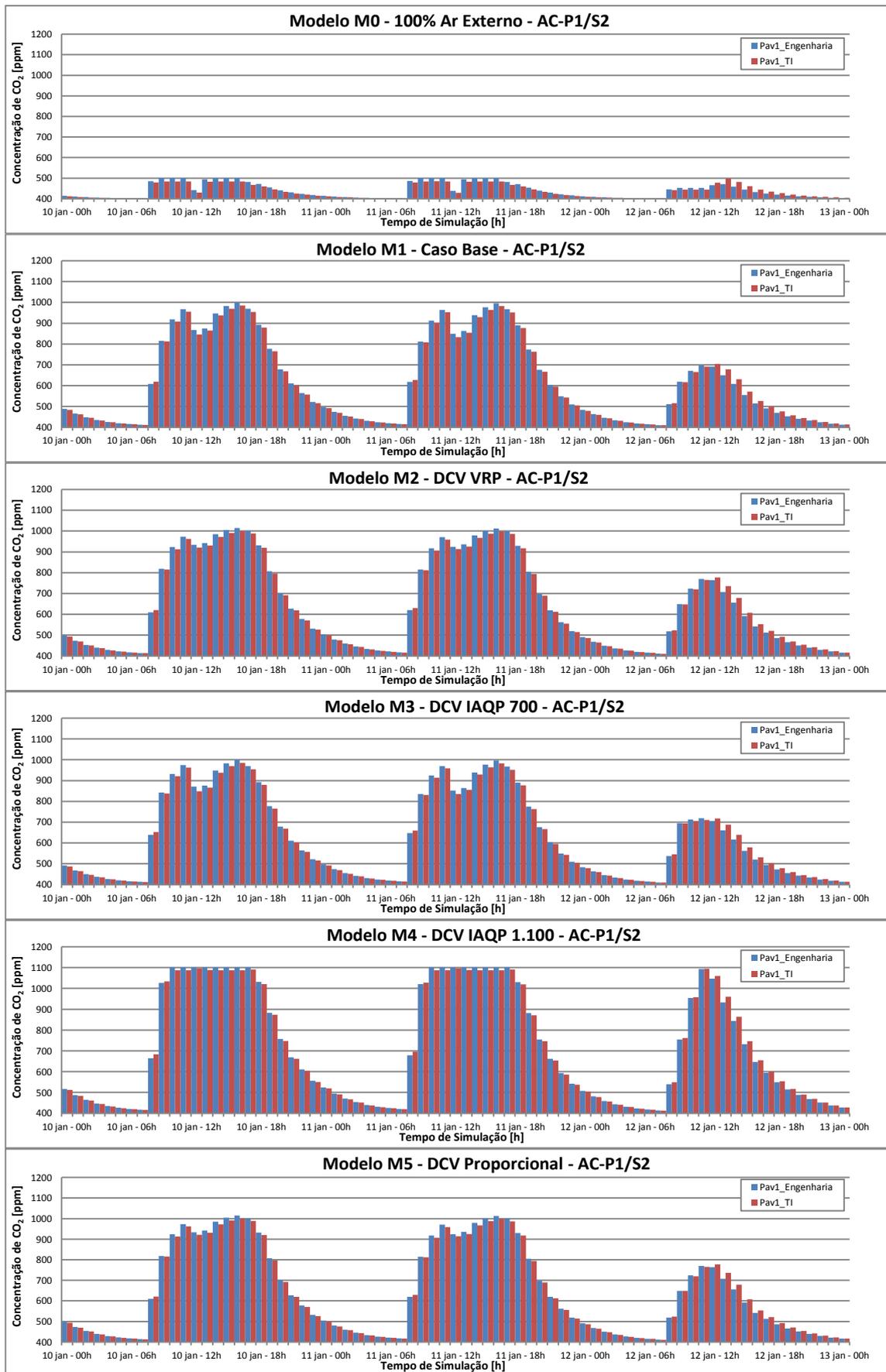


Figura 5.13: Concentração de CO₂ para as zonas térmicas do sistema AC-P1/S2.

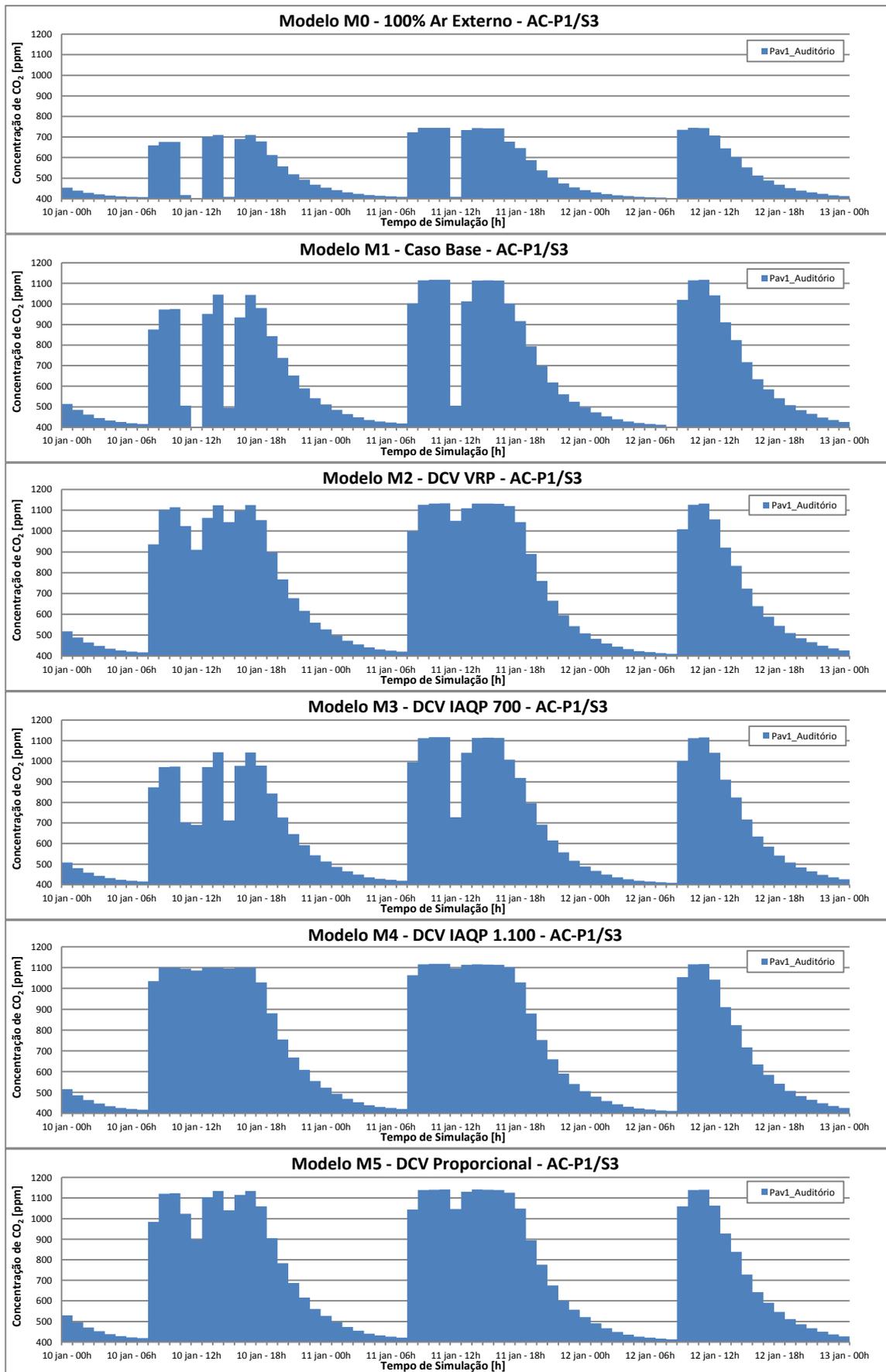


Figura 5.14: Concentração de CO₂ para o Pav1 – Auditório, no sistema AC-P1/S3.

Quanto ao M4, os sistemas conseguiram manter a concentração no *setpoint* para a maioria dos ambientes. Algumas salas registraram concentração pouco abaixo ou acima do especificado devido ao fato do ar externo ser fornecido por uma via única para todas as zonas atendidas por um mesmo sistema. Dessa forma, o ar externo é aplicado pela central para atingir o *setpoint* do ambiente com maior carga instantânea (geração) de CO₂, fazendo com que as outras zonas fiquem abaixo de 1.100 ppm. Isso não ocorreria se cada sala fosse dotada de sistemas dedicados de ar externo, pois ao contrário da temperatura, que é controlada por um único termostato, cada zona possui seu próprio sensor de CO₂. Porém, o tratamento do ar externo implicaria na adição de condicionadores de ar adicionais ao sistema, aumentando os custos de instalação e projeto. Por este motivo, sistemas dedicados de ar externo não foram considerados neste trabalho.

Já para um sistema com zona de controle única, como o AC-PT/S2, que serve ao Centro de Convivência, o comportamento das concentrações para cada estratégia de controle do ar externo é bastante diferente, como mostra a Figura 5.15. Neste caso, todos os modelos proporcionaram concentrações de CO₂ menores que a especificada para o modelo M4, de 1.100 ppm, com os picos de concentração acompanhando a ocupação.

Pode-se notar também que o Modelo M4, sem influências de outros ambientes, manteve perfeitamente a concentração em seu *setpoint* de CO₂. Para o Modelo M3 no entanto, nos momentos de máxima ocupação, a concentração de CO₂ também ultrapassou seu limite, quando a vazão máxima de ar externo não foi suficiente para manter a concentração em 700 ppm. Apenas com o sistema fornecendo ar totalmente renovado (M0), a concentração ficou abaixo deste valor.

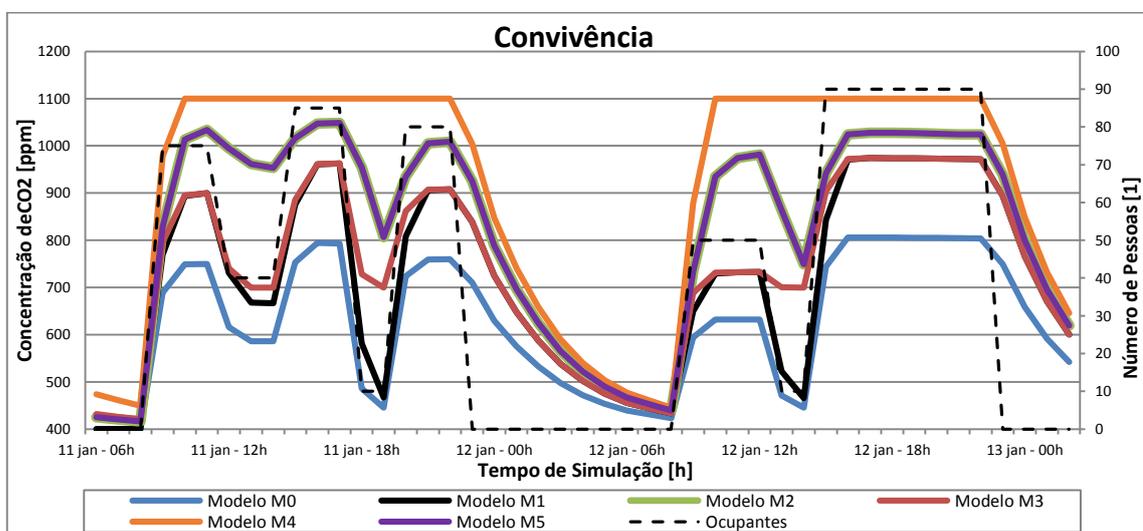


Figura 5.15: Concentração interna de CO₂ e ocupação instantânea no Convivência.

Para o Auditório, na Figura 5.16, a brusca queda de ocupação na hora do almoço causou queda considerável na concentração de CO₂ em todos os Modelos. Até mesmo o Modelo M4, com controle IAQP teve diminuição neste momento, o que não ocorreu nos outros ambientes analisados até aqui.

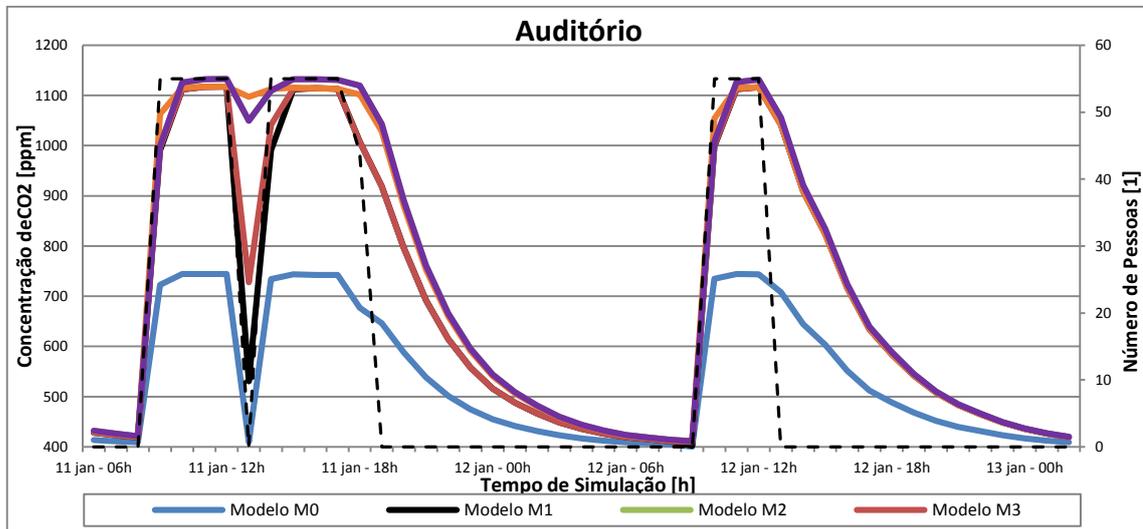


Figura 5.16: Concentração interna de CO₂ e ocupação instantânea no Auditório.

5.2 Consumo de Energia com DCV

Todo o embasamento científico para a aplicação da técnica de ventilação sob demanda provém do fato de que, quando o ar externo está em condições diferentes daquelas desejadas no ambiente interno, será necessário um dispêndio considerável de energia para resfriá-lo ou aquecê-lo até as condições desejadas.

Assim, a carga térmica devido ao ar externo é dada pela Equação 5.1:

$$\dot{Q}_{AE} = \dot{V}_{AE} \cdot \rho_{AE} \cdot \Delta h \quad (5.1)$$

Onde: \dot{Q}_{AE} : Carga térmica devido ao ar externo [kW];

\dot{V}_{AE} : Vazão volumétrica de ar externo [m³/s];

ρ_{AE} : Massa específica do ar externo [kg/m³];

Δh : Diferença de entalpia entre o ar externo e o ar interno [kJ/kg].

Portanto, diminuindo-se a vazão de ar externo V_{AE} , para a mesma diferença de entalpia, a carga térmica é reduzida. Por outro lado, vale ressaltar também que dependendo das

condições climáticas, a variação da entalpia do ar externo pode aumentar a carga térmica a ser removida na serpentina. A Figura 5.17 mostra a variação da entalpia do ar externo e da entalpia do ar de retorno para o equipamento AC-P1/S2 no Modelo M1, e a Figura 5.18 mostra a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa para o ambiente externo

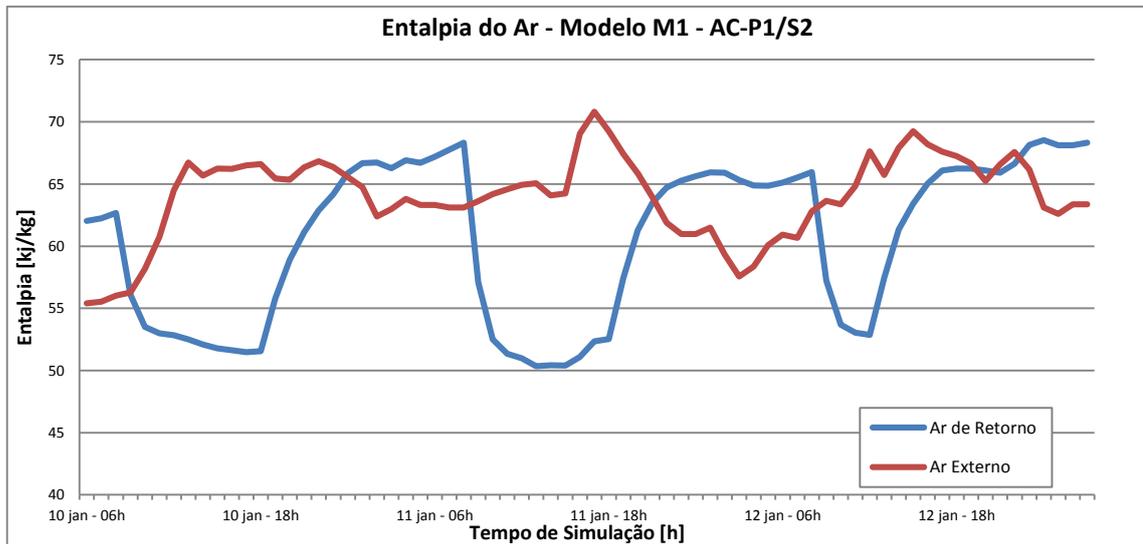


Figura 5.17: Entalpia do ar externo e entalpia do retorno do AC-P1/S2.

Observa-se da Figura 5.17 que ao longo do dia existe uma grande diferença entre a entalpia do ar externo e a entalpia do ar interno, no retorno do equipamento. É justamente nos momentos em que entalpia do ar externo é maior que a entalpia do ar de retorno que a aplicação do DCV pode gerar os resultados desejados, pois menos calor seria inserido no sistema pelo ar externo.

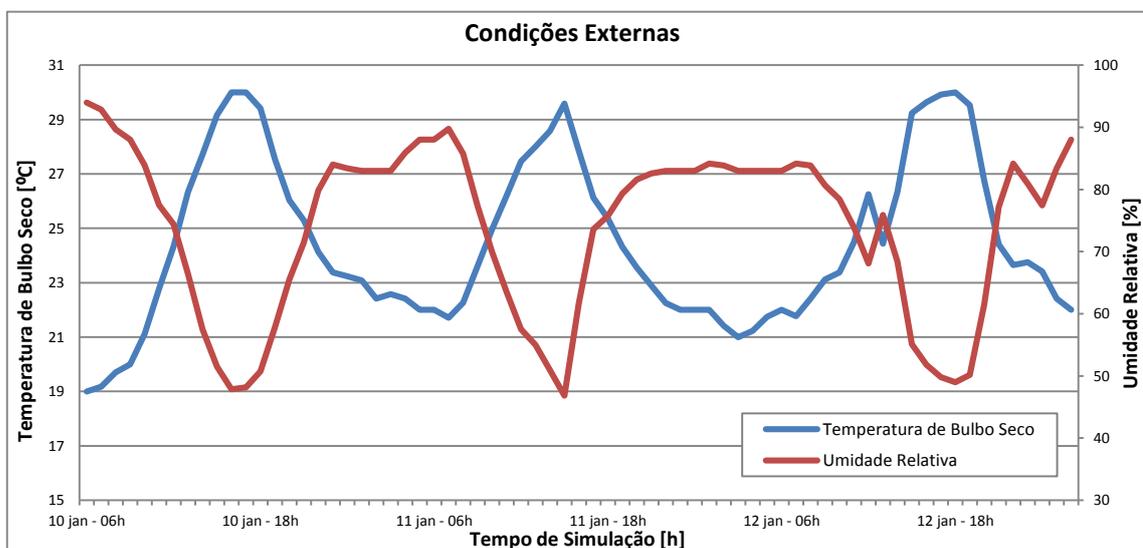


Figura 5.18: Temperatura de bulbo seco e umidade relativa para o ambiente externo.

Com base nessas premissas, supõe-se que a aplicação da técnica de controle do ar externo por meio do CO₂ DCV, pode proporcionar redução do consumo de energia, porém apenas nos momentos em que a ocupação do ambiente cai. Caso contrário, a redução do ar externo irá comprometer a qualidade do ar interno e o conforto dos ocupantes. Portanto, por sua própria definição, o DCV sozinho não poderá garantir uma redução substancial no consumo de energia, em edifícios que possuem perfil de ocupação constante ao longo da maior parte do ano.

No entanto, nem mesmo uma pequena economia foi obtida nos resultados. A Figura 5.19 mostra o consumo anual total do edifício por fonte e a Figura 5.20, o consumo anual total com condicionamento de ar. Como se observa, todos os casos analisados mostraram aumento no consumo anual de energia com relação ao Modelo M1, Caso Base. Supreendentemente, o único caso que registrou redução no consumo foi o M0, onde foi utilizado 100% de ar externo.

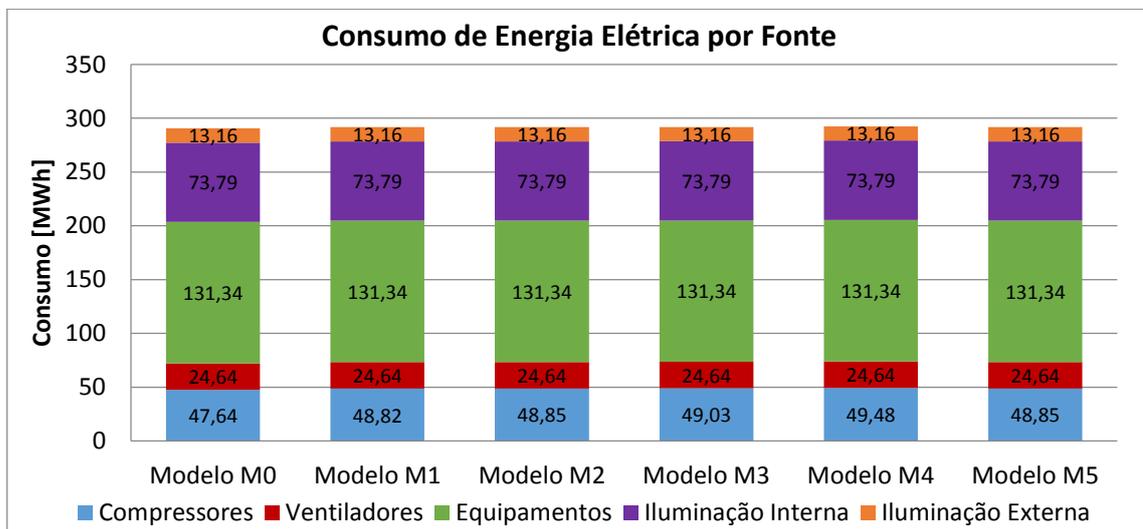


Figura 5.19: Consumo anual total de energia elétrica por fonte.

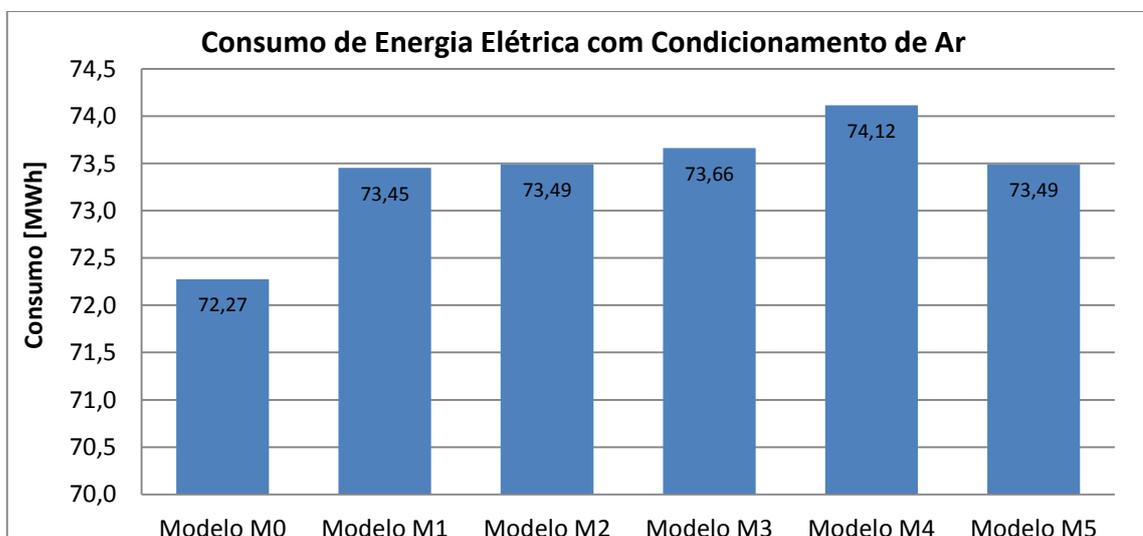


Figura 5.20: Consumo anual total de energia elétrica com condicionamento de ar.

Por outro lado, os modelos que registraram consumo mais próximo ao Caso Base foi o M2 (CO₂ DCV VRP) e o M5 (CO₂ DCV Proporcional), e o maior aumento no consumo ocorreu no modelo M4 (CO₂ DCV IAQP), com concentração de CO₂ fixada em 1.100 ppm. Ou seja, o consumo de energia aumentou com a redução da vazão do ar externo de renovação, contrariando todas as expectativas, conforme será visto na sequência.

Além do consumo excessivo de energia, em muitos ambientes do M3, o sistema não conseguiu atingir o *setpoint* de 700 ppm, pois não foi dimensionado para tanto, e apenas com 100% de ar externo a concentração ficou abaixo desse valor no M0. Mesmo no caso do M3 era esperada uma redução no consumo, pois em alguns momentos do dia, a concentração de CO₂ ficava abaixo de 700 ppm no Caso Base Modelo M1, conforme mostrara a Figura 5.12, a Figura 5.13 e a Figura 5.14. Dessa forma, esperava-se que o consumo no modelo M3 ficasse pouco abaixo ao do Caso Base M1, pois na maior parte do dia o sistema trabalhou com o ar externo no valor máximo (que é igual ao utilizado constantemente em M1). Vale ressaltar que o objetivo de se simular o IAQP com *setpoint* de 700 ppm no modelo M3 era justamente se obter uma excelente qualidade de ar interno com consumo próximo ao do caso base.

O Modelo M4, com controle DCV IAQP 1.100 ppm, causou o maior consumo dentre todos os casos simulados, quando o esperado era justamente o contrário. Porém, o Modelo M4 registrou a estabilização da concentração de CO₂ em 1.100 ppm, cumprindo sua função neste sentido.

Finalmente, quanto ao Modelo M5, assim como a concentração de CO₂, o consumo de energia teve comportamento bastante similar ao Modelo M2. Ou seja, o Modelo M5 permitiu uma sensível redução no consumo quando comparado ao DCV IAQP, e com qualidade do ar interno similar ao M2, mas ainda acima do consumo do Modelo M0 e do M1, Caso Base.

Portanto, todos os Modelos contrariaram as expectativas, apresentando aumento de consumo ao invés de redução. E o Modelo M4, para o qual eram esperados os melhores resultados, foi o que registrou o maior consumo de todos. Porém, os resultados apresentados referem-se ao consumo anual, que logicamente não permitem uma análise profunda dos casos, para se identificar onde ocorreram estes aumentos inesperado. Assim, deve-se analisar detalhadamente os resultados para os períodos de verão, meia estação e inverno, para avaliar a influência das condições externas.

Outro dado relevante notado nas análises anteriores, refere-se à maior desumidificação de ar interior nos Modelos dotados de controle DCV, principalmente no Modelo M4. Tal fato

indica que esses Modelos operaram com maior carga latente na serpentina de resfriamento e desumidificação, o que contribuiu com o aumento do consumo. Por outro lado, deve-se ressaltar que tal aumento de consumo também permitiu uma melhor qualidade de ar interior quanto à umidade relativa, que ficou sempre na faixa de 50% no Modelo M4. Por isso, as próximas análises devem ser feitas, também, com foco no conforto e não somente no consumo de energia.

Assim, analisando o funcionamento dos sistemas, tomando como exemplo o dia (08 de janeiro), através da Figura 5.21, da Figura 5.22 e da Figura 5.23, observa-se que na maior parte do dia, a carga térmica sobre a serpentina de resfriamento e desumidificação (SRD) é menor com o emprego de quaisquer das estratégias de controle do DCV. Porém no início da manhã, a situação se inverte e a carga com DCV torna-se maior que a carga sem DCV. Observa-se também que, nos momentos em que o DCV provoca aumento da carga térmica na serpentina, o M0 provoca redução.

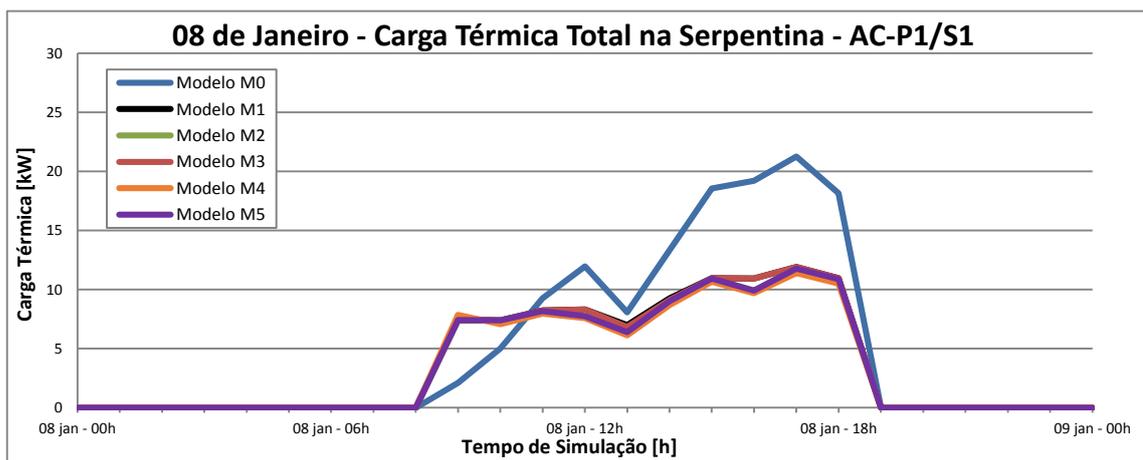


Figura 5.21: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S1, no dia 08 de Janeiro.

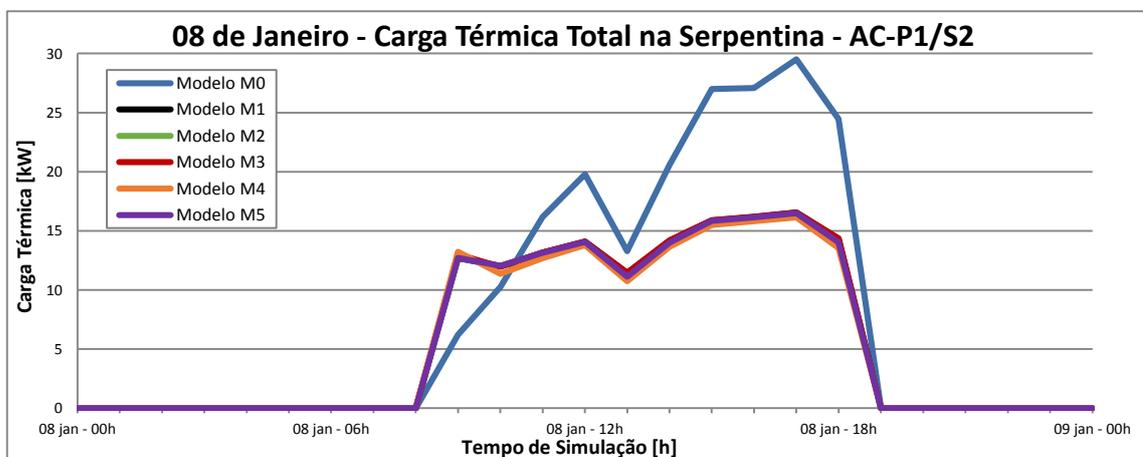


Figura 5.22: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S2, no dia 08 de Janeiro.

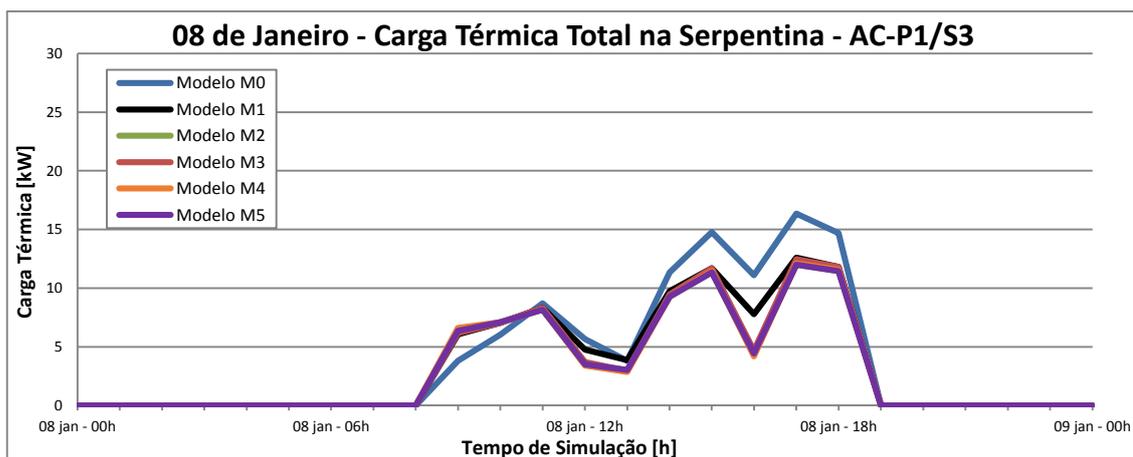


Figura 5.23: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S3, no dia 08 de Janeiro.

Pode-se observar essa redução de consumo permitida pelo Modelo M0 nas primeiras horas do dia não é necessariamente relevante, considerando que por volta das 16 horas, quando ocorre o pico de ganho de calor pela estrutura, a carga térmica de M0 é muito maior que a dos demais modelos. Mas ilustra perfeitamente o que ocorre na meia estação, no inverno e, até mesmo em muitos dias de verão, quando o ar externo ajuda a remover a carga térmica fazendo com que o compressor trabalhe em carga parcial menor do que trabalharia se fosse dotado de DCV. Deve ficar claro que o dia 08 de janeiro foi tomado apenas como exemplo.

Ou seja, durante os períodos de meia estação e inverno, a situação se torna totalmente a favor do Modelo M0. Nesse contexto, a Figura 5.24, a Figura 5.25 e a Figura 5.26 mostram o dia 07 de janeiro (também tomado como exemplo). Dia imediatamente anterior ao mostrado nas Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.23, a carga térmica sobre a serpentina do modelo M0, com o uso de 100% de ar externo, é menor que todos os demais ao longo de todo o dia 07 de janeiro.

É interessante notar, também para o dia 07 de janeiro, que apesar do sistema ser acionado às 08:00, para o Modelo M0 nos sistemas AC-P1/S1 e AC-P1/S2, o compressor parte, porém passa a ter carga considerável sobre a SRD somente por volta das 10:00. Por outro lado, nos casos com DCV, o compressor parte com plena carga no mesmo momento em que o sistema é ativado. Ou seja, quanto menos ar externo se fornece ao ambiente, pela aplicação do DCV, mais cedo o sistema atinge sua capacidade máxima e, conseqüentemente, funciona nesta condição por mais tempo durante o dia. Assim, nos momentos em que as condições externas são mais amenas, com temperatura de bulbo seco e entalpia baixas, o ar de renovação ajuda a remover a carga térmica gerada no edifício, que é o objetivo do Economizador de Ar Externo (EAE), a ser analisado na Seção 5.3. Este controle aumenta a vazão de ar externo para reduzir o consumo de energia com compressão de vapor, quando as condições externas são favoráveis.

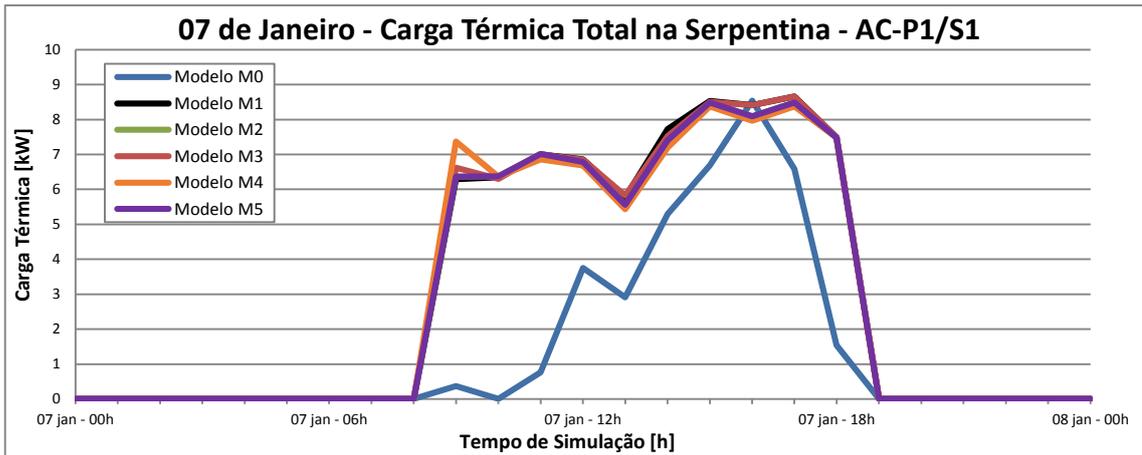


Figura 5.24: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S1, no dia 07 de Janeiro.

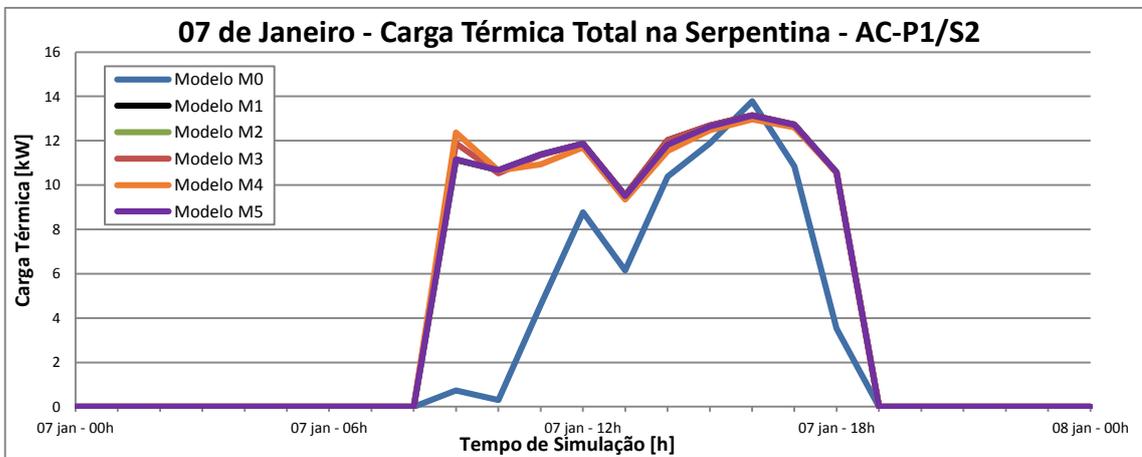


Figura 5.25: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S2, no dia 07 de Janeiro.

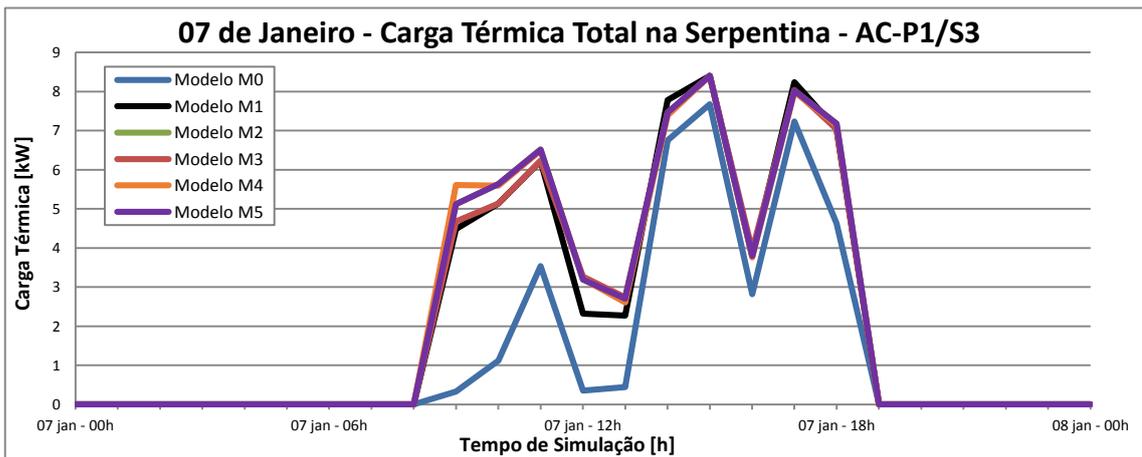


Figura 5.26: Carga térmica total para Sistema AC-P1/S3, no dia 07 de Janeiro.

Portanto, a vazão do ar externo que foi diminuída com o intuito de economizar energia estava, na verdade, ajudando a remover a carga térmica. Ao entrar em operação, o M1 e principalmente o M0, fornecem ar externo em uma taxa constante ao ambiente, nos momentos em que a temperatura externa é mais amena e as cargas internas ainda são baixas.

Dessa forma, apenas o ar externo é capaz de neutralizar a carga térmica sem o uso da serpentina de resfriamento e desumidificação e, conseqüentemente, do compressor. Nos demais Modelos, quando a concentração interna de CO₂ é baixa e próxima da externa, estes diminuem o ar externo para zero e a carga térmica, que em M1 e M0 era neutralizada na caixa de mistura, passa a ser removida na SRD nos Modelos DCV, aumentando o uso do compressor.

A Figura 5.27, a Figura 5.28 e a Figura 5.29 mostram como exemplo o dia 19 de Julho, onde, para os sistemas AC-P1/S1, AC-P1/S2 e AC-P1/S3, a carga térmica sobre a serpentina foi nula ao longo de todo o dia para M0, com 100% de ar externo. Vale ressaltar que ao longo do ano, conforme o clima esfria, as situações mostradas nessas figuras ficam cada vez mais frequentes, o que explica o aumento de consumo causado pelas estratégias de implementação do DCV. Dessas figuras também se observa que quanto maior a redução na vazão de ar externo proporcionada pelo DCV, maior o aumento no consumo, o que justifica o péssimo desempenho da estratégia IAQP, tanto para a configuração de 700 ppm como para a de 1.100 ppm.

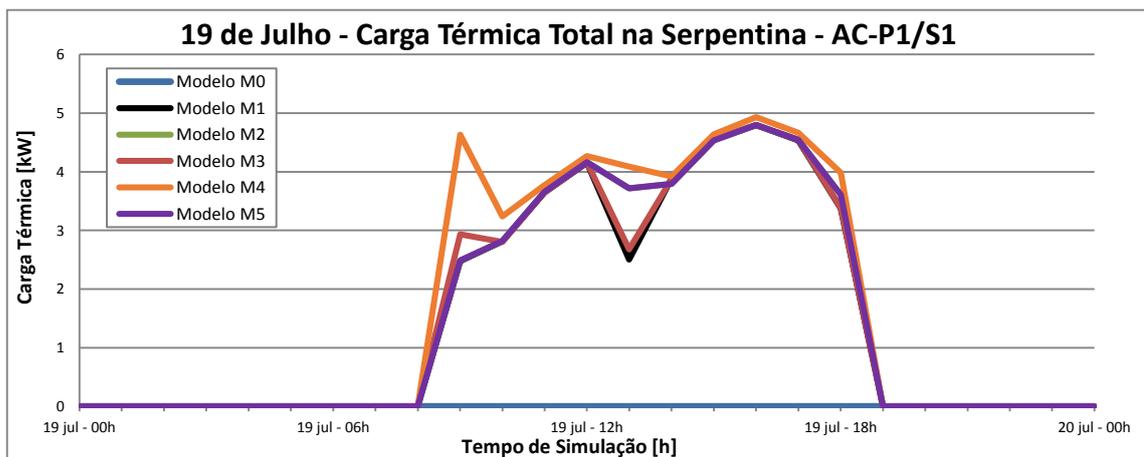


Figura 5.27: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S1, no dia 19 de Julho.

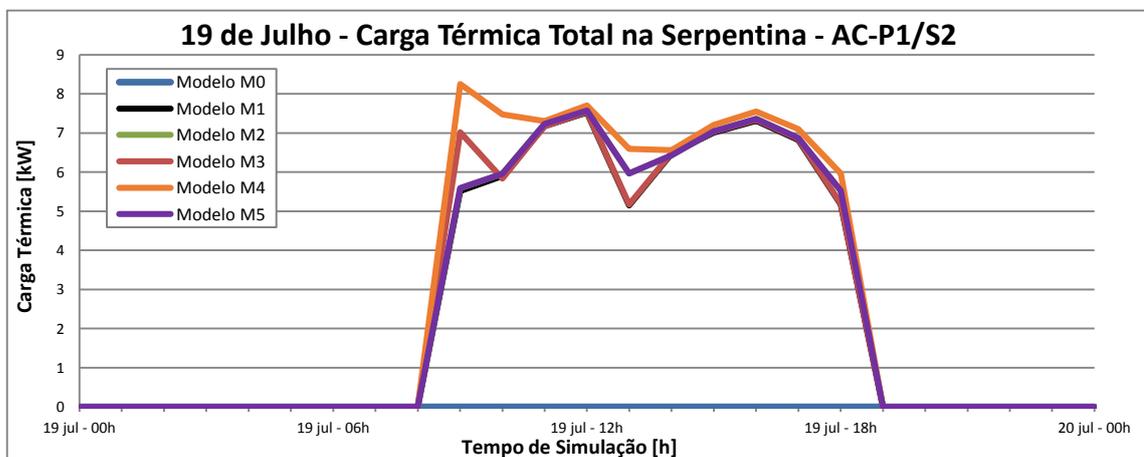


Figura 5.28: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S2, no dia 19 de Julho.

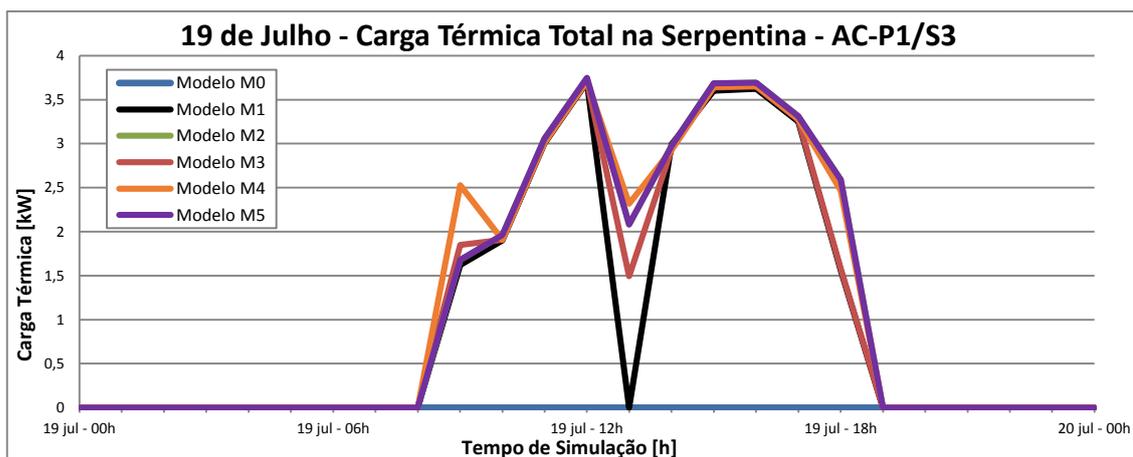


Figura 5.29: Carga térmica total para o Sistema AC-P1/S3, no dia 19 de Julho.

Para a condição de inverno, mostrada nas três figuras anteriores, deve-se ressaltar que o uso de 100% de ar externo no Modelo M0, provoca queda na temperatura interna dos ambientes, devido ao fato de os sistemas não contarem com serpentinas de aquecimento. Assim, se o equipamento permanece em modo ventilação, com o compressor desligado, durante o dia todo, significa que não existe carga térmica a remover na SRD e a temperatura está abaixo de 24 °C. Portanto, a insuflação de uma alta vazão de ar externo frio compromete as condições de conforto, assim como fez com que o *setpoint* de temperatura demorasse a ser atingido na Convivência, para a condição de verão, na análise da Figura 5.3 na Seção 5.1

Para melhor visualizar o impacto do ar de renovação sobre o consumo de energia, ainda para a condição de inverno, a Figura 5.30, a Figura 5.31 e a Figura 5.32 mostram a comparação de cada uma das estratégias de controle simuladas (M0, M2, M3, M4 e M5), com o Modelo Caso Base M1, levando-se em conta a carga térmica sobre a serpentina de resfriamento e desumidificação e a vazão mássica de ar externo. Estas duas variáveis são plotadas em um mesmo plano cartesiano para o Modelo Caso Base M1 e para o Modelo da estratégia com o qual está sendo comparado.

Assim, mantém-se a convenção de cores utilizada até o momento, nos gráficos que mostraram as variáveis de sistema: Azul para o Modelo M0, Preto para o Modelo M1, Verde para o Modelo M2, Vermelho para o Modelo M3, Laranja para o Modelo M4 e Roxo para o Modelo M5. Ainda, as curvas em linhas cheias representam a carga térmica e as curvas em linhas tracejada, denotam as vazões mássicas de ar externo.

A Figura 5.30, a Figura 5.31 e a Figura 5.32 mostram esta comparação para os sistemas AC-P1/S1, AC-P1/S2 e AC-P1/S3 respectivamente, de onde se pode notar que em todos os casos o DCV provoca aumento na carga de refrigeração para inverno.

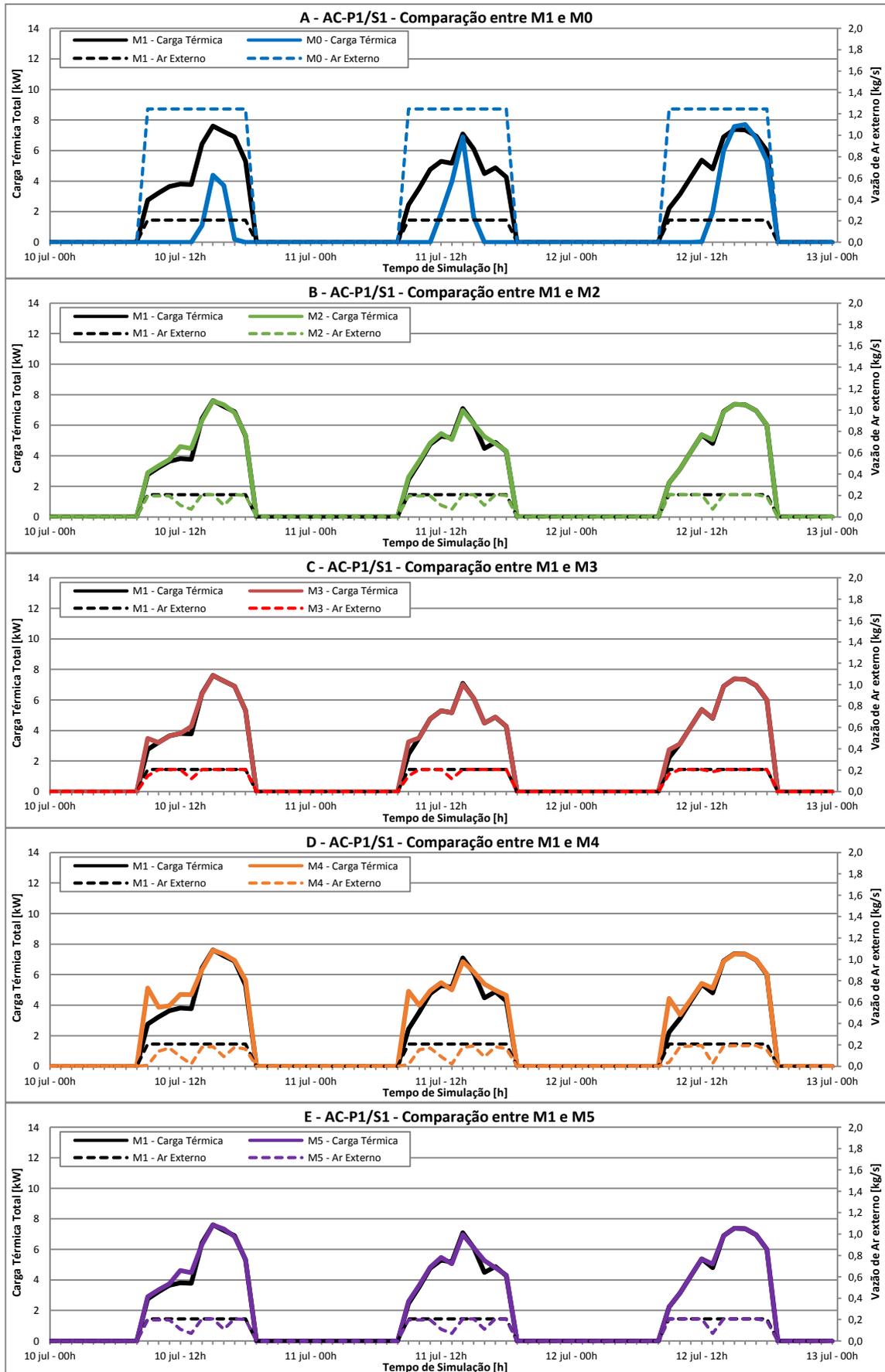


Figura 5.30: Influência das estratégias de controle do ar externo sobre a carga térmica total na condição de inverno para o Sistema AC-P1/S1.

Para a Figura 5.30-A, na comparação entre M1 e M0, a alta vazão de ar externo de M0 causou picos de carga térmica nos momentos mais quentes do dia, porém este pico não foi maior que o do Modelo M1. E o ar externo praticamente neutralizou todo o calor gerado internamente no dia 10 de julho. Entre M1 e M2, na Figura 5.30-B, observa-se que a redução na vazão de ar externo imposta pelo controlador DCV VRP no horário de almoço do dia 10 de julho, fez com que a carga térmica aumentasse com relação ao M1, que mantém a vazão constante. Ainda, nota-se que outras reduções de vazão ocorridas às 16 horas, não teve efeito na carga térmica para o dia 10 e novamente causou aumento no dia 11.

Quanto ao IAQP, na Figura 5.30-C e Figura 5.30-D, observa-se pequenos picos de carga térmica ocorridos no início das manhãs, quando o DCV reduz a vazão de ar externo, que não existiam na curva Modelo M1. No caso do Modelo M4, no início da manhã, o sistema opera com vazão de ar externo nula devido ao fato de a concentração de CO₂ estar abaixo de 1.100 ppm. Nestas condições, todo o calor gerado internamente é removido exclusivamente na Serpentina de Resfriamento e Desumidificação (SRD), portanto com o uso do compressor. Enquanto no Modelo M0, o compressor parte algumas horas mais tarde pois o ar externo frio remove o calor sem o uso da SRD, conforme já mencionado anteriormente.

Nota-se também que o M3, ao trabalhar com *setpoint* de CO₂ mais baixo, insufla mais ar externo nos ambientes para chegar à concentração de 700 ppm e acaba por consumir menos energia que o M4, com configuração bem mais alta, de 1.100 ppm. Finalmente, quanto ao Modelo M5, mais uma vez os resultados foram bastante próximos aos do Modelo M2, conforme se nota a partir da comparação da Figura 5.30-C com a Figura 5.30-E.

Assim, os resultados indicam que o Modelo M0 reduziu o consumo de energia no edifício. Porém, como já foi mostrado, uma taxa de 100% de ar externo compromete as condições de conforto, diminuindo a temperatura interna e aumentando a umidade relativa, dependendo das condições externas. Obviamente, de maneira nenhuma um equipamento com essa configuração deve ser utilizado como sistema principal de um edifício, pois impossibilita o controle efetivo da temperatura interna, quando a temperatura do ar externo está abaixo da temperatura de conforto e a umidade relativa interna permanece sem controle algum. Normalmente, equipamentos como o Modelo M0 são usados como sistemas dedicados de ar externo (auxiliar), e fazem apenas o tratamento do ar de renovação, enquanto um outro equipamento (principal) controla as condições ambientes e remove as cargas internas.

A Figura 5.31 e a Figura 5.32 mostram a mesma análise anterior para os sistemas AC-P1/S2 e AC-P1/S3, onde, em geral, os resultados seguiram as mesmas tendências.

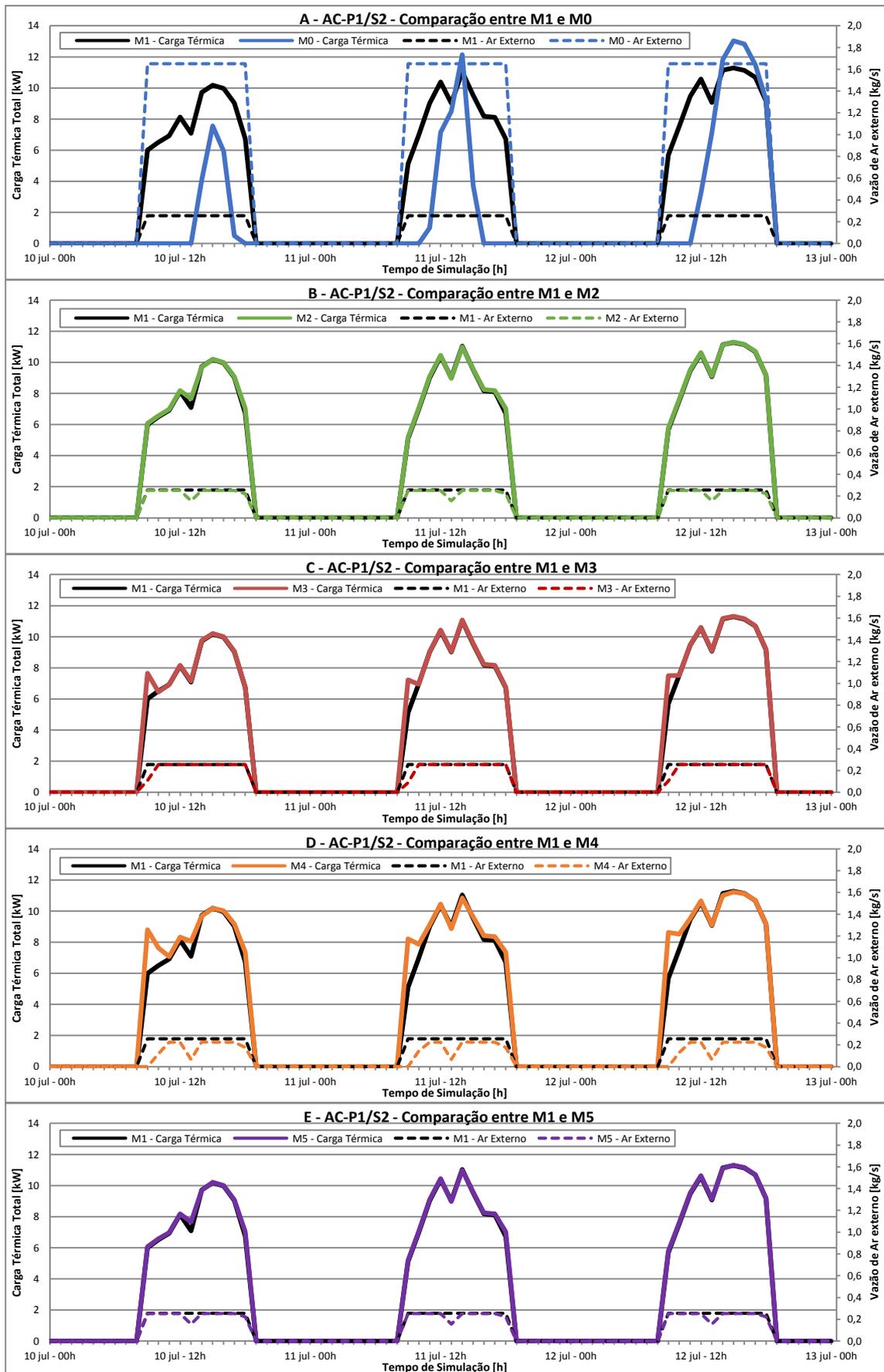


Figura 5.31: Influência das estratégias de controle do ar externo sobre a carga térmica total na condição de inverno para o Sistema AC-P1/S2.

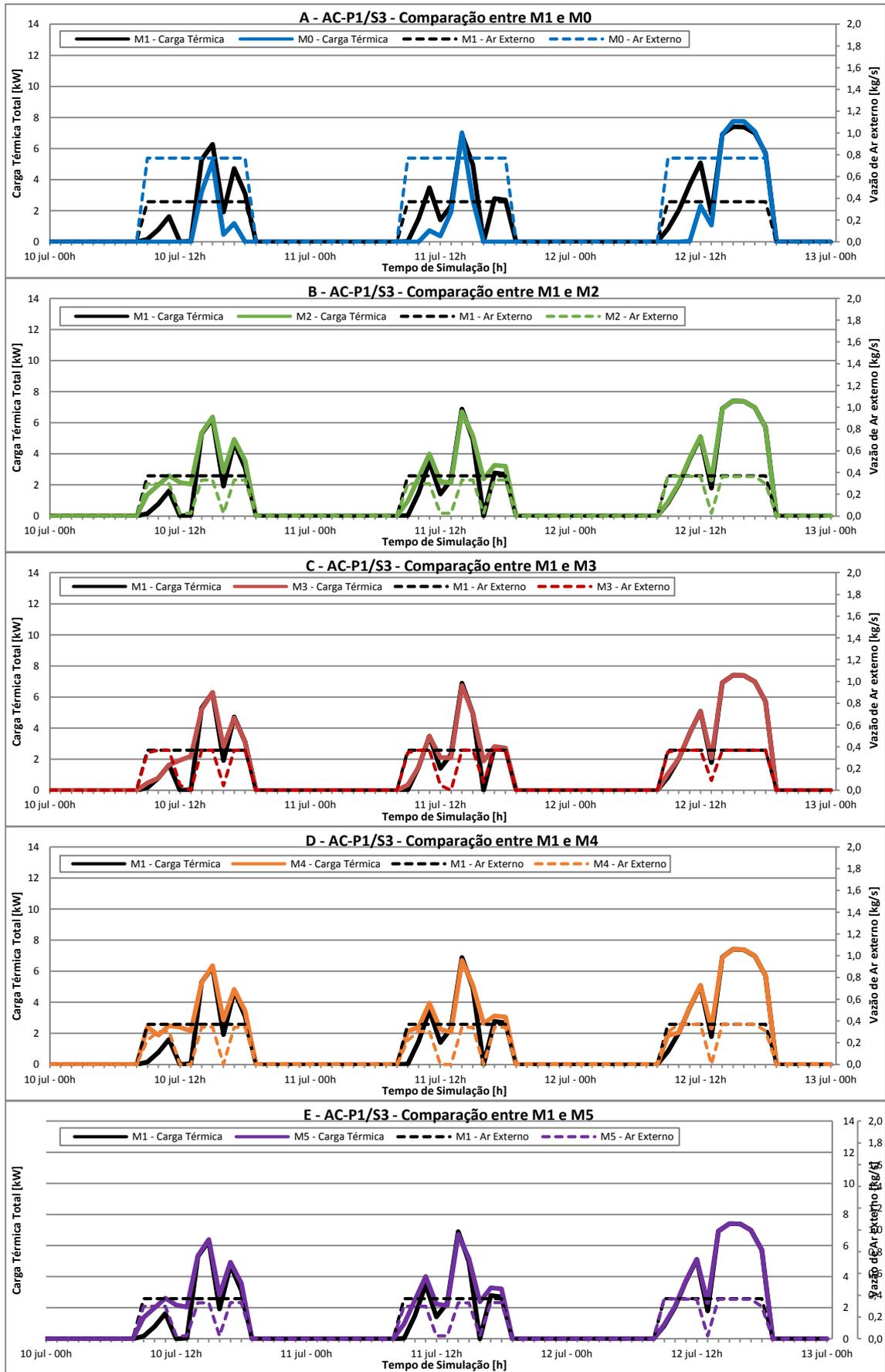


Figura 5.32: Influência das estratégias de controle do ar externo sobre a carga térmica total na condição de inverno para o Sistema AC-P1/S3.

Assim, no consumo anual, os momentos em que o DCV economiza energia são menores que aqueles em que a diminuição da vazão de ar exterior causa aumento na carga térmica sobre a SRD. A Figura 5.33 mostra o consumo de energia elétrica nos compressores (sem incluir os ventiladores dos evaporadores) dos equipamentos de ar-condicionado do Pavimento 1. Observa-se que ao menos entre os meses de Março e Novembro, a redução do ar externo de renovação causa aumento no consumo. Portanto, conclui-se que o DCV não é interessante em todas as situações e seu emprego deve ser combinado com os chamados Economizadores de Ar Externo (EAE), para promover o resfriamento gratuito, conforme mostrado na próxima seção.

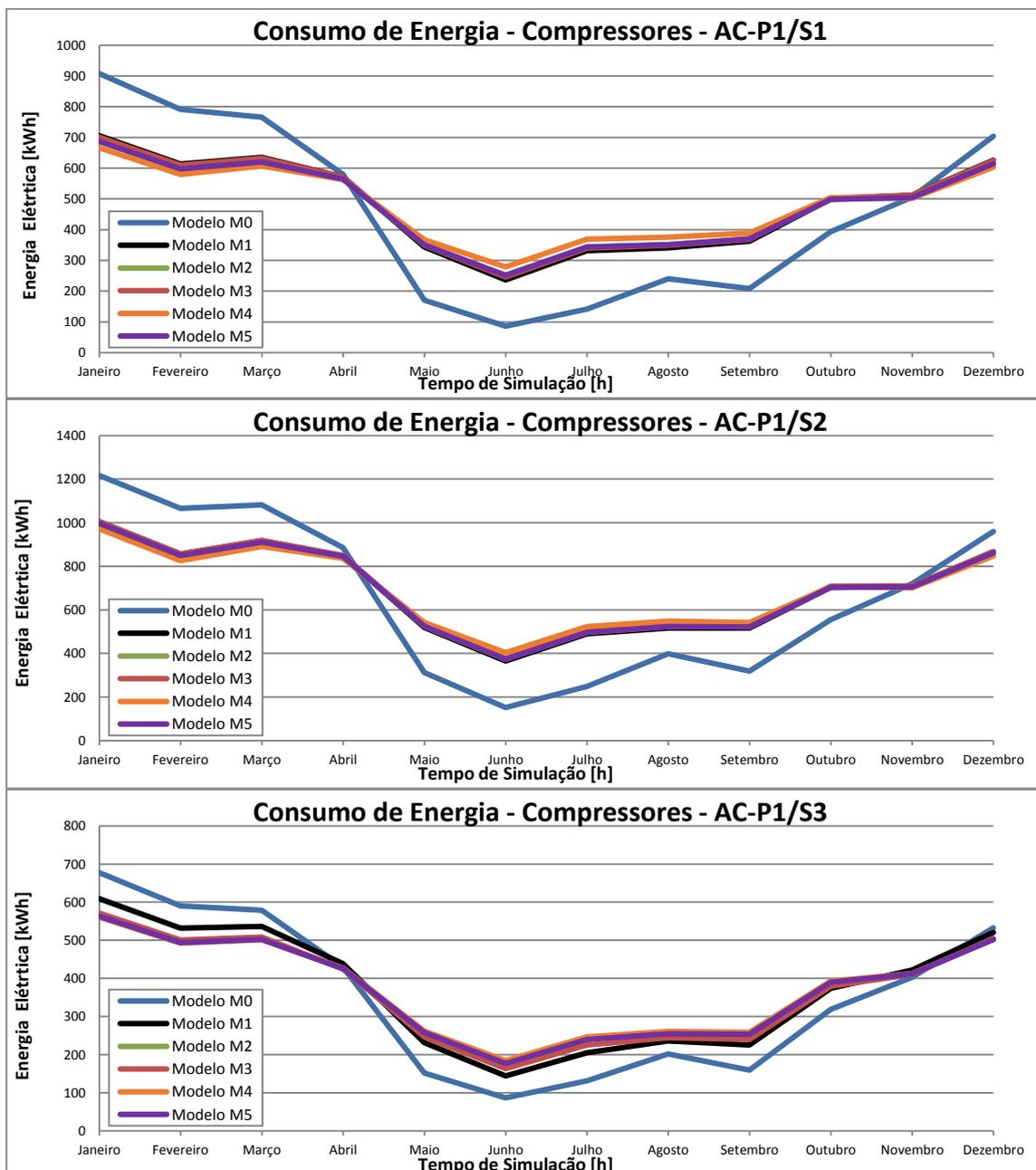


Figura 5.33: Consumo mensal de energia elétrica nos compressores para o Pavimento 1.

Finalmente, pode-se concluir da aplicação do DCV que justamente suas maiores vantagens, listadas anteriormente, como o melhor controle das condições de conforto, fazem com que ele consuma mais energia. E no caso analisado neste trabalho, onde se avaliou o clima de São Paulo, o aumento do consumo associado à melhora das condições internas é ainda maior que seu potencial de redução de consumo nos momentos mais quentes do dia, considerando o ano como um todo. Ou seja, com relação ao Modelo M1 Caso Base, o DCV-IAQP aumentou o consumo anual de energia da edificação, com condicionamento de ar, em 0,90%.

5.3 O Economizador de Ar Externo

Conforme se observou na Figura 5.30, na Figura 5.31 e na Figura 5.32, pela manhã a carga térmica é nula para o Modelo M0, intermediária para o Modelo M1 e maior que os dois últimos nos Modelos com DCV, para a condição de inverno. Ainda, a carga térmica aumenta conforme se reduz a vazão de ar externo pelo DCV, atingindo seu valor máximo para o Modelo M4. Nesta condição climática, portanto, fica claro que o Economizador de Ar Externo (EAE), ajudaria a reduzir o consumo de energia se estivesse ativado nestes horários, quando o consumo do M0 é menor. Por outro lado, quando o consumo do M0 é maior, como na Figura 5.21, na Figura 5.22 e na Figura 5.23, por exemplo, o DCV assumiria o comando dos dampers de ar externo e retorno, reduzindo o consumo de energia nos momentos mais quentes do dia para o nível permitido pelo DCV, sobretudo no Modelo M4.

Assim, analisando-se mais precisamente os resultados, se podem buscar quais variáveis ambientais causam a inversão das curvas de carga térmica, quando a carga térmica na serpentina de resfriamento e desumidificação (SRD), torna-se maior no Modelo M0 que nos demais. E dessa forma, pode-se definir uma estratégia de controle para alternar o uso do DCV e do EAE em momentos-chaves do dia, com base nas condições externas. As principais candidatas são as mesmas variáveis utilizadas para o controle do ar externo com o uso de economizadores:

- Temperatura de bulbo seco do ar externo;
- Entalpia do ar externo;
- Temperatura de ponto de orvalho do ar externo.

O DCV e o EAE possuem filosofias totalmente contrárias uma à outra. Enquanto o DCV reduz a vazão de ar externo com o intuito de economizar energia, o EAE faz justamente o contrário com o mesmo objetivo, aumentando a vazão de ar externo para promover o resfriamento com uso mínimo do compressor. Apesar de antagônicas, as duas técnicas descritas acima são complementares e podem ser usadas em conjunto com o objetivo de somar os melhores benefícios de cada, em momentos diferentes do dia. Neste sentido, a maior dificuldade é definir o critério para se selecionar uma ou outra filosofia, pois nem mesmo para a aplicação individual do EAE existe um mesmo critério que satisfaça todas as condições climáticas que podem ocorrer em uma mesma localidade.

Considerando, portanto, o sistema AC-PT/S2 pelo fato de atender uma única zona, e apenas os Modelos M0, M1, M2 e M4, pelo fato de serem os mais representativos em termos de resultados e de terem maior interesse prático, uma nova análise pode ser feita. Em um mesmo plano cartesiano com o tempo de simulação nas abscissas, pode-se mostrar os resultados de carga térmica total na serpentina, analisados na Seção 5.2, e as variáveis de controle mencionadas anteriormente nesta Seção. Na próxima Seção 5.3.1, serão feitas análises com base na Temperatura de Bulbo Seco e, em seguida, na seção 5.3.2, serão mostradas as análises com base na Entalpia, ambas para o ar externo. Dessa forma, busca-se identificar qual dessas variáveis causa mais precisamente a inversão das curvas de carga térmica.

5.3.1 Controle pela Temperatura de Bulbo Seco

Inicialmente analisam-se as temperaturas de bulbo seco interna e externa, juntamente com as cargas térmicas na serpentina de resfriamento e desumidificação, para o Modelo M0, que é adotado como referência, e para os Modelos M1, M2, M3 e M4, sucessivamente. O resultado é mostrado na Figura 5.34 para a condição de verão e na Figura 5.35 para inverno. Dessa forma, pode-se observar as cargas térmicas variando ao longo do tempo, conforme as condições externas mudam durante o dia. No momento em que as curvas se cruzam e a carga térmica para o Modelo M0 (curva cheia azul) torna-se maior que para o Modelo M1 (curva cheia preta), na Figura 5.34-A por exemplo, a utilização de 100% de ar externo passa a consumir mais energia e deixa de ser energeticamente interessante. A partir desse momento, deve-se diminuir a vazão de ar de renovação, pois as condições externas deixam de permitir o resfriamento sem uso do compressor.

Pela Figura 5.34, nota-se que a temperatura externa torna-se maior que a temperatura interna por volta das 11 horas da manhã e cai, voltando a ser menor por volta das 12:30 horas para, enfim, subir e atingir seu máximo valor para o dia 8 de Janeiro às 16 horas. Juntamente com a temperatura externa, a carga térmica para o Modelo M0, curva cheia azul na Figura 5.34-A, oscila e intercepta várias vezes a curva de carga térmica para o Modelo M1 (preta cheia). Esse comportamento faz com que o dia 08 de Janeiro em particular seja altamente representativo para se definir as condições externas que causam a inversão na curva de carga térmica.

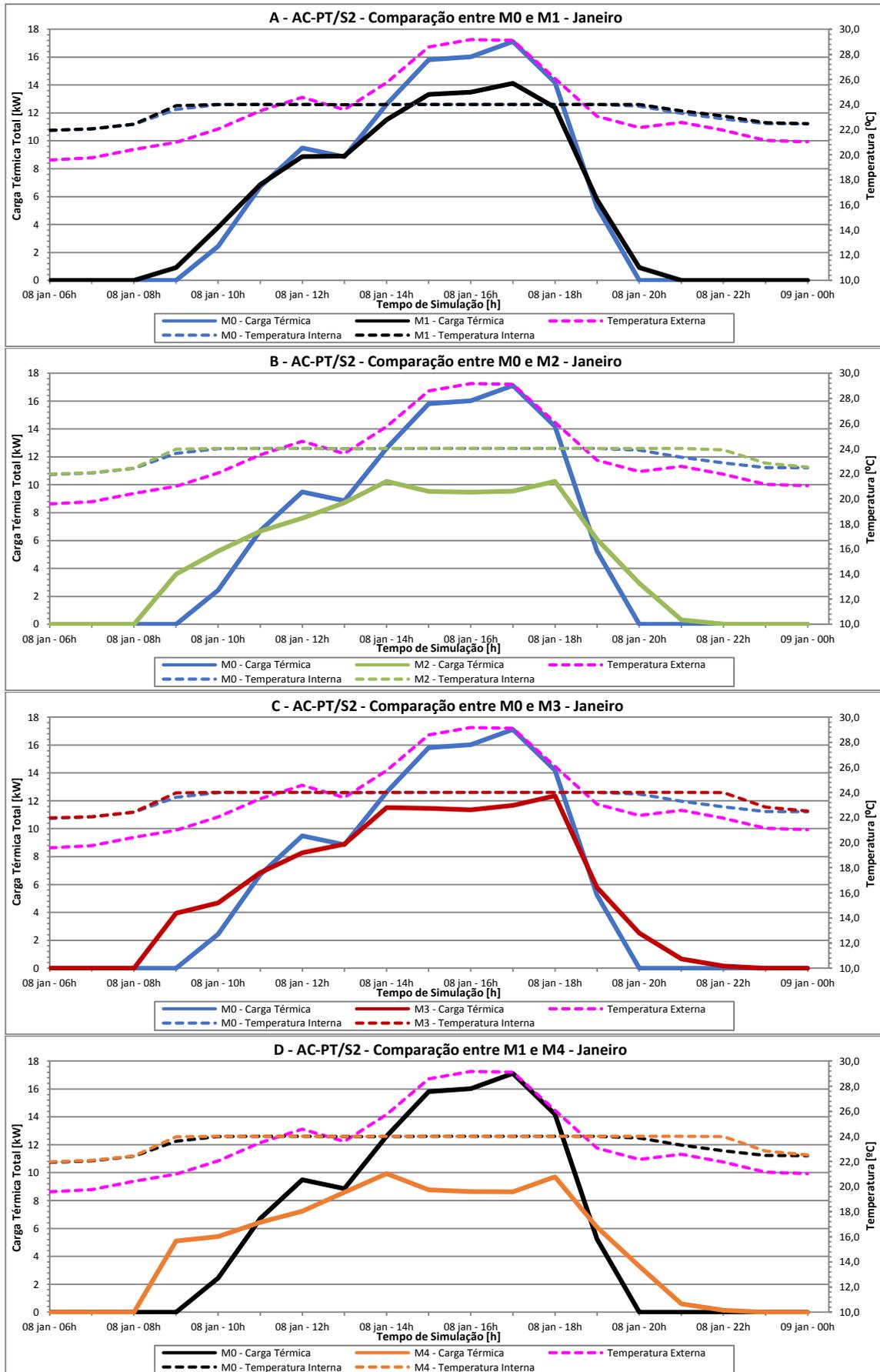


Figura 5.34: Inversão de carga térmica para as temperaturas interna e externa no Verão.

Devido ao fato de se utilizar 100% de ar externo, a carga térmica no Modelo M0 torna-se fortemente dependente das condições externas, visto que para os demais modelos, esta variação de temperatura não causa grande variação na carga térmica (curvas cheias verde, vermelha e laranja, na Figura 5.34-B, Figura 5.34-C e Figura 5.34-D, respectivamente). Outro fato interessante, mostrado pela Figura 5.34 e que já foi discutido anteriormente, é que o compressor parte em média uma hora depois dos demais no Modelo M0 e é desligado, uma ou duas horas antes.

Analisando-se as curvas de temperatura, observa-se que a inversão ocorre em geral por volta dos 23,5°C para a temperatura de bulbo seco externa, no período mostrado na Figura 5.34. Ou seja, a estratégia de controle para o Economizador de Ar Externo baseado na temperatura de bulbo seco, fixada em 23,5°C, levaria a resultados bastante satisfatórios.

Dessa forma, com a temperatura externa acima da 23,5°C, o controlador de ar externo reduziria a vazão do ar de renovação para o mínimo, que é o valor especificado em norma, e ativaria o controlador DCV. Ainda com base nesta mesma análise, poderia ser adotada também a estratégia do controle diferencial da temperatura de bulbo seco, pois como a temperatura interna é 24,0° C, não haveria grande impacto no consumo. Nesta estratégia, sempre que a temperatura externa se torna maior que a interna, o ar externo é reduzido ao mínimo.

A Figura 5.35 mostra a mesma análise da Figura 5.34 para a condição de inverno. Observa-se que a temperatura externa está sempre abaixo da temperatura interna e que a carga térmica com o uso do DCV é sempre maior que nos Modelos M0 e M1. Nestas condições, prevaleceria o uso do Economizador de Ar Externo, porém a temperatura interna poderia ficar abaixo de 24°C, a exemplo do que ocorre também nos Modelos M0 e M1, na Figura 5.35-A, já que os sistemas não contam com serpentina de aquecimento.

Observa-se que a temperatura se mantém no *setpoint* por apenas alguns momentos durante o dia 10 de julho, mesmo no Modelo M1, o que não ocorre com o uso do DCV. Na prática, o Modelo M1 representa a maioria dos sistemas instalados no Brasil, com ar externo fixo no valor de norma e sem serpentina de aquecimento. Nestas condições, os ocupantes desligariam os sistemas e o ambiente interno ficaria sem renovação de ar, porém em temperatura confortável. Tal fato, que resultaria em redução do consumo ao custo da piora da qualidade do ar, não foi considerado nas simulações e os sistemas funcionam durante o ano todo, conforme exige a norma. Para o DCV, este problema não ocorre e a temperatura de conforto é mantida sem o uso de serpentinas de aquecimento.

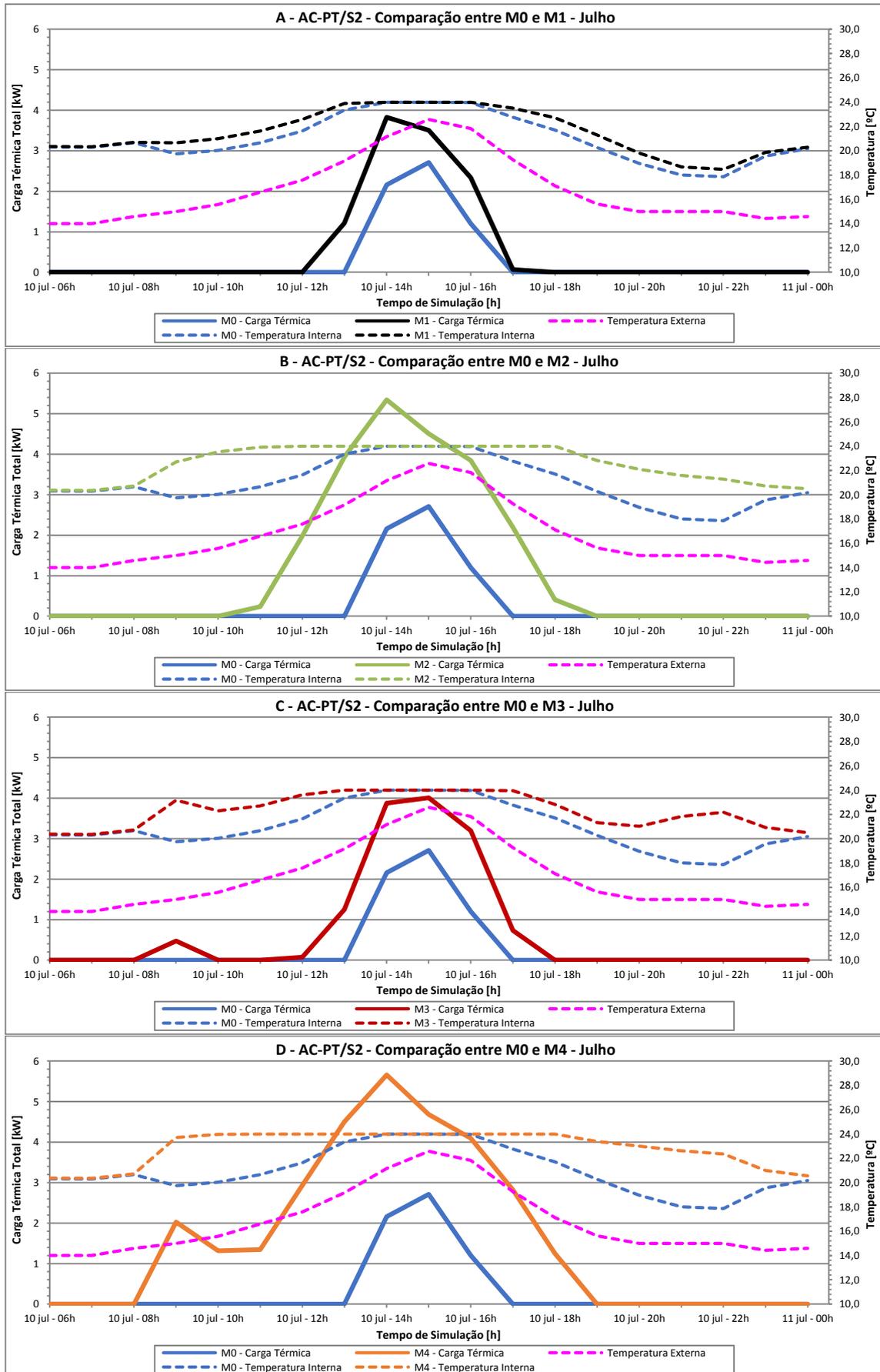


Figura 5.35: Inversão de carga térmica para as temperaturas interna e externa no Inverno.

A Figura 5.36 mostra a mesma análise observada na Figura 5.34 e na Figura 5.35 para a condição de meia estação, no dia 05 de março. Nota-se de forma geral, que as observações feitas anteriormente continuam válidas e a carga térmica em M0 torna-se maior que em M1 e M4 no momento em que a temperatura externa torna-se maior que a interna.

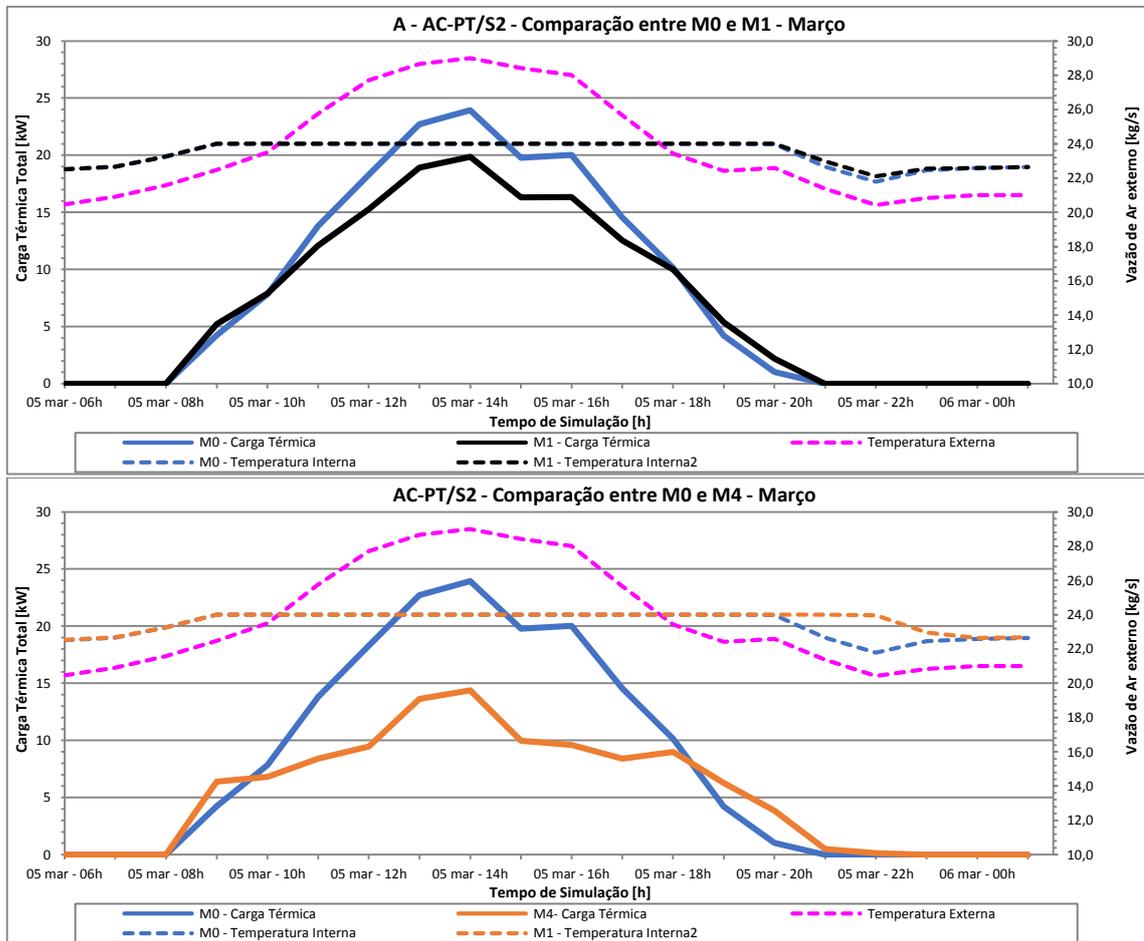


Figura 5.36: Inversão de carga térmica para as temperaturas interna e externa na Meia Estação.

Com o uso do EAE, o problema de queda da temperatura interna apontado na Figura 5.35, devido ao uso de alta vazão de ar externo frio não ocorreria, pois o controlador modularia a vazão de ar externo para insuflar o ar a uma temperatura satisfatória. Ou seja, com o EAE ativado, se a temperatura na saída da caixa de mistura (entrada da SRD) for maior que a temperatura de insuflação, o controlador usará ar externo máximo e a SRD se encarregará de resfriá-lo até o ponto de insuflação. Por outro lado, se a temperatura de mistura for menor que a temperatura de insuflação, o ar externo é modulado para, em conjunto com o ar de retorno mais quente, atingir a temperatura de insuflação e manter as condições de conforto nos ambientes. No segundo caso, se obtém o chamado resfriamento gratuito (*free cooling*), sem uso do compressor. Teoricamente, quanto á temperatura, o EAE não irá interferir nas condições de conforto e poderá ser implementado com vazão de ar externo igual à do Modelo M0.

5.3.2 Controle por Entalpia

Do ponto de vista da Termodinâmica, as estratégias baseadas no controle da entalpia são as mais promissoras, pois a diferença desta propriedade entre a entrada e a saída da SRD, é diretamente proporcional ao calor total trocado, para vazão mássica constante, conforme a Equação 5.1. Dessa forma, se o ar externo possui entalpia alta, deve-se insuflar o mínimo possível de ar externo ao sistema, pois caso contrário, a carga térmica sobre a serpentina aumentaria consideravelmente.

Portanto, nestas condições, apenas o ar externo necessário para manter a salubridade do ambiente deve ser inserido no sistema, através do condicionador de ar. Por outro lado, com entalpia baixa, o ar externo tem condições de promover o resfriamento gratuito e deve ser insuflado, preferencialmente, com vazão suficiente para ajudar a neutralizar parte da carga térmica interna na caixa de mistura, antes que ela chegue à serpentina, porém sem comprometer as condições de conforto. Esta estratégia pode ser implementada através de um valor limite de entalpia externa, acima do qual a vazão de ar externo é reduzida ao mínimo (Entalpia Fixa) ou através da entalpia interna, que reduz o ar externo sempre que a entalpia externa se torna maior que a interna (Diferencial de Entalpia). Analisemos então as condições de entalpia interna (retorno) e externa que causa a inversão nas curvas de carga térmica entre o Modelo M1 caso base e o Modelo M0 com 100% de ar externo.

No ano climático típico utilizado para a simulação deste trabalho, o mês de janeiro começou com temperaturas baixas e altas umidades relativas para os dias 02 e 03. Em seguida, nos dias 07 e 08 a temperatura subiu, chegando próximo aos 30 °C, e a umidade relativa caiu. Dessa forma, conforme mostram as próximas análises, tem-se condições favoráveis para a avaliação da estratégia de controle do ar externo com base na entalpia, e pode-se fazer considerações bastante relevantes em um curto período de tempo. Mais uma vez, deve-se frisar que estes dias são apenas exemplos e não representam condições de projeto ou típicas.

Também será mostrado na Figura 5.37, na Figura 5.38 e na Figura 5.39, que mesmo para a condição de verão, existem dias em que o Modelo M0 consome menos energia que todos os demais, chegando a ter consumo zero devido à ação do ar externo. Assim, essas análises ajudam a justificar o menor consumo anual do Modelo M0. Para melhor avaliar a influência das variáveis consideradas, além dos gráficos de inversão de carga térmica com a entalpia, são mostradas as variações de temperatura e umidade relativa para o mesmo período de simulação.

Quando a entalpia externa torna-se maior que a interna, começa-se a ter carga térmica adicional na SRD devido ao ar de renovação. Portanto para o AC-P1/S2, observando-se a Figura 5.37-A, nota-se que para o M0 a entalpia do ar interno (curva azul tracejada) se mantém pouco acima da entalpia do ar externo (vermelha tracejada) durante todo o dia 02 de janeiro. Dessa forma, não ocorre inversão, e a carga térmica no Modelo M0 é sempre menor que no Modelo M1, evidenciando, mais uma vez, o baixo consumo do Modelo M0. Por outro lado, a alta entalpia no retorno indica alta umidade relativa nos ambientes. Quanto às condições externas, observa-se na Figura 5.37-B, que a temperatura ficou baixa para o mês de janeiro (em torno de 20 °C) e a umidade ficou alta, durante o dia todo.

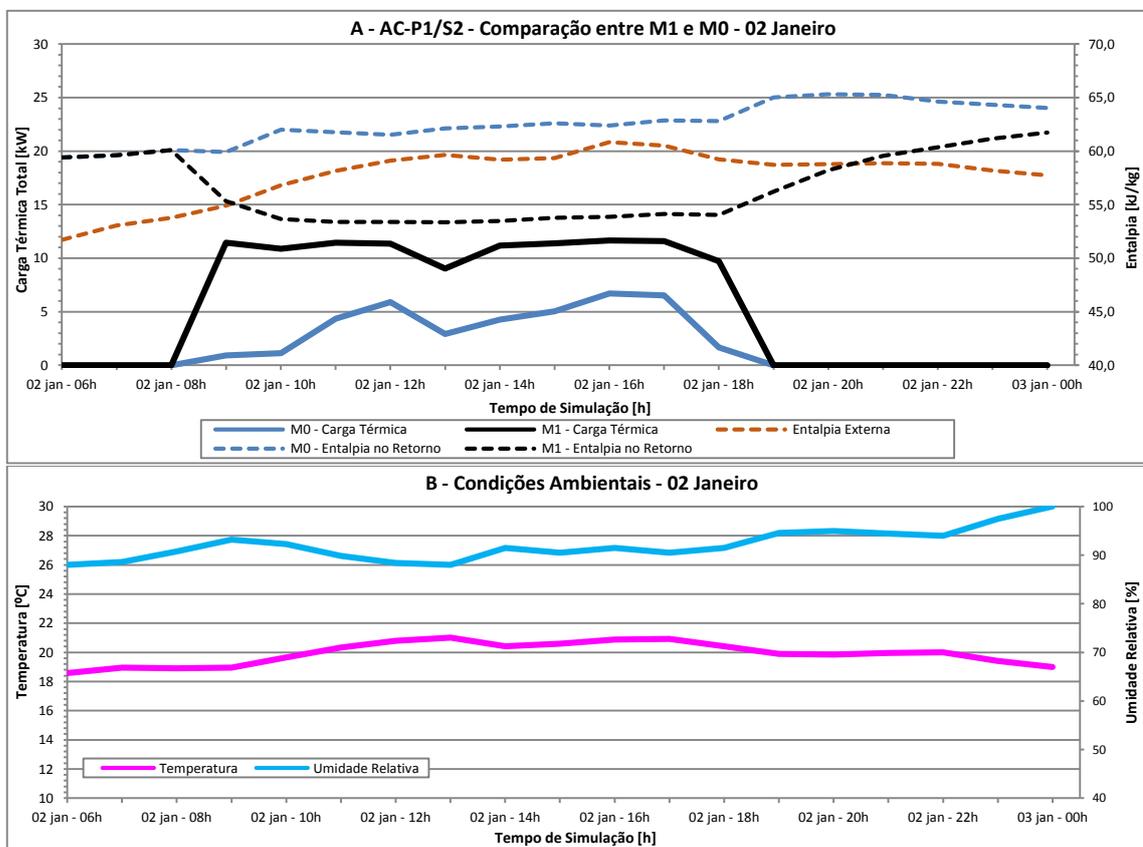


Figura 5.37: Inversão de carga térmica para as entalpias interna e externa no sistema AC-P1/S2 e condições ambientais em 02 de janeiro.

De modo análogo para o dia 03 de janeiro, também no sistema AC-P1/S2, ocorreu inversão nas curvas de carga térmica e o modelo M0 passou a consumir mais energia que o Modelo M1, conforme mostra a Figura 5.38-A. Essa inversão coincidiu com a inversão das curvas de entalpia, e apenas nos momentos em que a entalpia do ar externo esteve acima da entalpia do ar interno, a carga térmica foi maior no Modelo M0 que no Modelo M1.

Para o Modelo M4, na Figura 5.38-B, observa-se que a curva de carga térmica é praticamente constante ao longo do dia todo, e não acompanha a variação da entalpia do ar externo. Como no início do dia a ocupação do ambiente, e conseqüentemente a concentração de CO₂, ainda são baixas, o controle DCV reduz consideravelmente a vazão de ar externo, fazendo com que o Modelo M4 consuma mais energia que o Modelo M1 e o Modelo M0, pois todo o calor interno é removido na SRD. Quando a entalpia externa sobe, a atuação do DCV reduz o efeito desta na carga térmica pois, como já mencionado, as diminuições de ocupação geralmente ocorrem nos momentos mais quentes do dia, permitindo ao DCV reduzir a vazão de ar externo em momentos críticos.

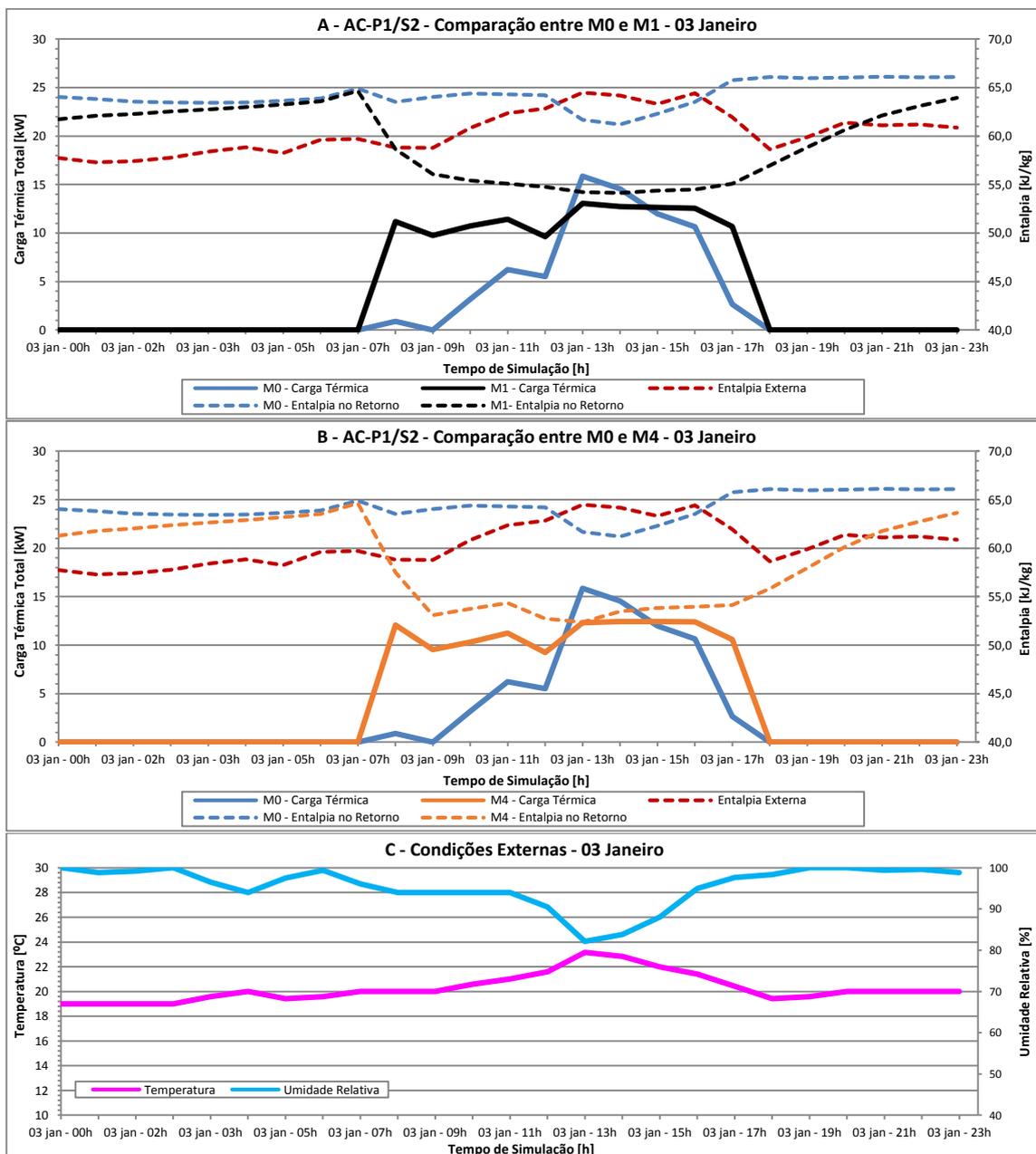


Figura 5.38: Inversão de carga térmica para as entalpias interna e externa no sistema AC-P1/S2 e condições ambientais em 03 de janeiro.

Em 08 de janeiro, o dia foi consideravelmente mais quente que os anteriores, conforme as condições externas mostradas na Figura 5.39-C. Dessa forma o Modelo M0 possui um elevado consumo de energia nos momentos em que a entalpia externa está alta. Observa-se inclusive que na Figura 5.39-A, a curva de carga térmica para esse Modelo (azul cheia) acompanha a curva de entalpia do ar externo (vermelha tracejada), principalmente na oscilação ocorrida entre 10 horas e 14 horas.

Observa-se também que a carga térmica nos Modelos M1 e M4 são bastante parecidas, com uma pequena redução no Modelo M4. Isso ocorre pois a vazão de ar externo em geral fica próxima à vazão do Modelo M1 ao longo do dia, pois a ocupação dos ambientes Engenharia e TI, atendidos pelo sistema AC-P1/S2, não apresenta grandes flutuações.

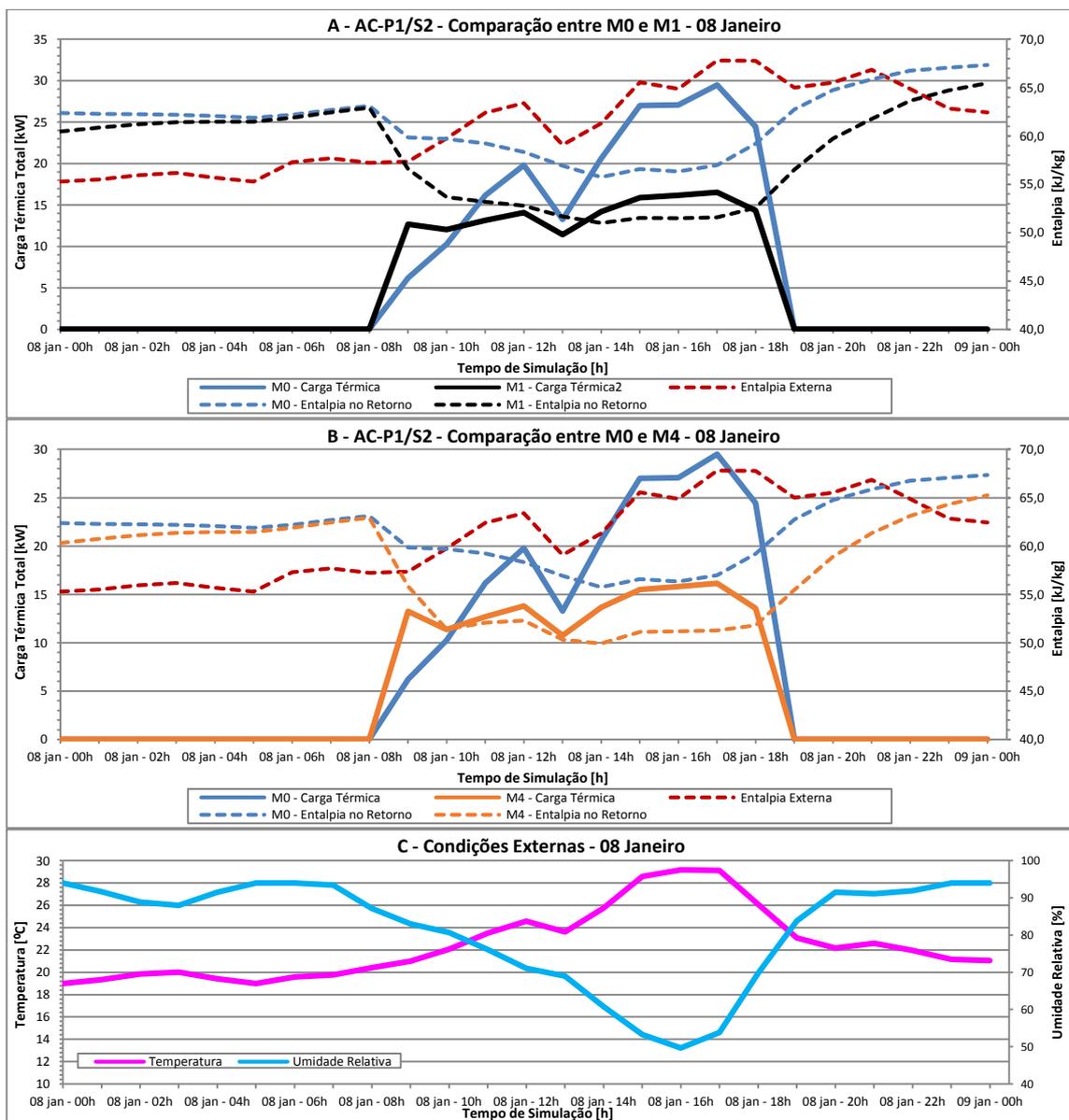


Figura 5.39: Inversão de carga térmica para as entalpias interna e externa no sistema AC-P1/S2 e condições ambientais em 08 de janeiro.

Por outro lado, mais uma vez nota-se o aumento de carga térmica causado pela redução da vazão de ar externo no início da manhã, tanto em M1 como em M4. Este efeito, somado ao longo de todo o ano, faz com que o DCV consuma mais energia que M0 e M1.

Quanto aos demais sistemas, as tendências mostradas na Figura 5.37, na Figura 5.38 e na Figura 5.39, foram mantidas. Para o AC-PT/S2, que atende a zona única do Centro de Convivência, conforme mostra a Figura 5.40 para o dia 08 de janeiro, os resultados foram ainda mais claros. Observa-se a alta carga térmica nos Modelos M0 e M1, quando a temperatura de bulbo seco externa esteve alta e próxima aos 30 °C, entre 12 horas e 18 horas, com a entalpia também alta.

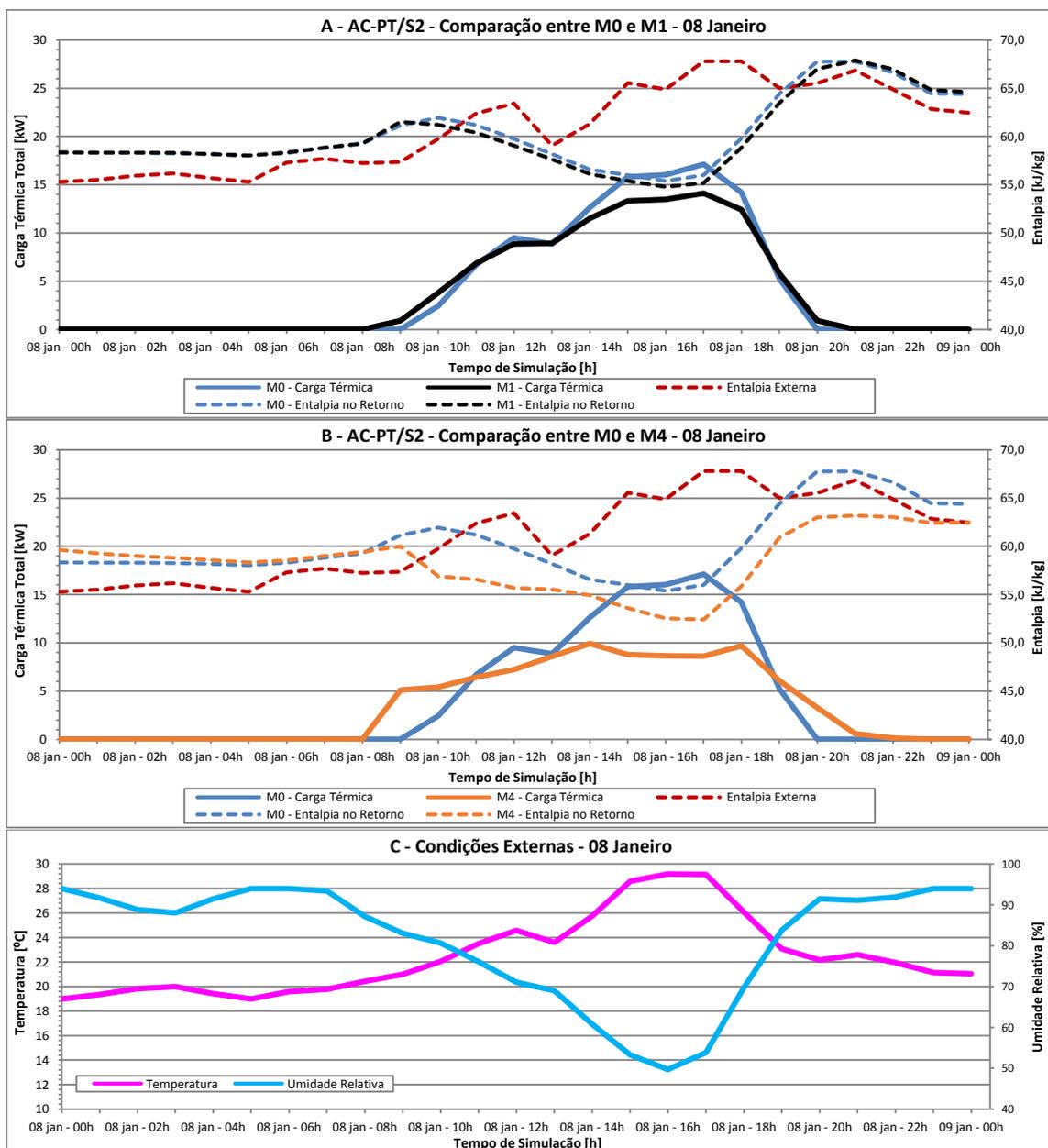


Figura 5.40: Inversão de carga térmica para as entalpias interna e externa no sistema AC-PT/S2 e condições ambientais em 08 de janeiro.

Observa-se também, a maior redução da carga térmica permitida pelo controle DCV do Modelo M4 (Figura 5.40-B), nestes mesmos momentos, com relação ao AC-P1/S2 das figuras anteriores. Neste caso, o ambiente Convivência tem grandes oscilações de ocupação ao longo do dia, condição em que o DCV possui melhor desempenho, e permite maior redução no consumo.

E como o sistema AC-PT/S2 é o único do edifício que funciona à noite, devido aos eventos noturnos realizados no ambiente Convivência, observa-se que o aumento da carga térmica observada no início da manhã, também ocorre no final da tarde e à noite, causada pela redução da vazão de ar externo no Modelo M4. Neste período, as condições do ar externo voltam a ser semelhantes às da manhã, permitindo que, também o EAE, tenha melhor desempenho neste sistema.

Neste dia, o EAE combinado com o DCV permitiria um consumo parecido com o consumo do Modelo M0 antes das 11 horas e após às 19 horas. E no restante do dia, o consumo seria similar ao do Modelo M4. Porém, deve-se cuidar para que a umidade relativa interna não fique excessivamente alta pois, conforme a Seção 5.1.2, a Convivência e o Auditório foram os ambientes que apresentaram os piores resultados neste quesito.

Finalmente, para a condição de inverno, conforme mostra a Figura 5.41, não ocorreu inversão das curvas de carga térmica no sistema AC-PT/S2, assim como no dia 02 de janeiro, para o AC-P1/S2, mostrado na Figura 5.37. Mais uma vez, o maior consumo de energia ocorreu nos momentos em que a entalpia do ar externo esteve alta.

Observa-se ainda que, para o Modelo M0 na Figura 5.41-A, o sistema consome energia apenas em um pequeno momento ao longo do dia, devido à soma das cargas internas e de ventilação. Enquanto que para o Modelo M4 na Figura 5.41-B, o sistema tem carga térmica na SRD praticamente ao longo do dia todo, devido à diminuição da vazão de ar externo pelo controle DCV.

Mais uma vez, deve ser ressaltado, que o menor consumo de energia do Modelo M0 ocorre às custas da piora das condições de conforto no interior dos ambientes. A temperatura interna cai, devido à insuflação de alta vazão de externo frio e, a umidade relativa aumenta, devido à condição úmida do ar externo. Por outro lado, o Modelo M4 mantém as condições de conforto, pois como há carga térmica na serpentina, a temperatura interna tende a ficar acima do *setpoint* e o equipamento condicionador à mantém em 24°C.

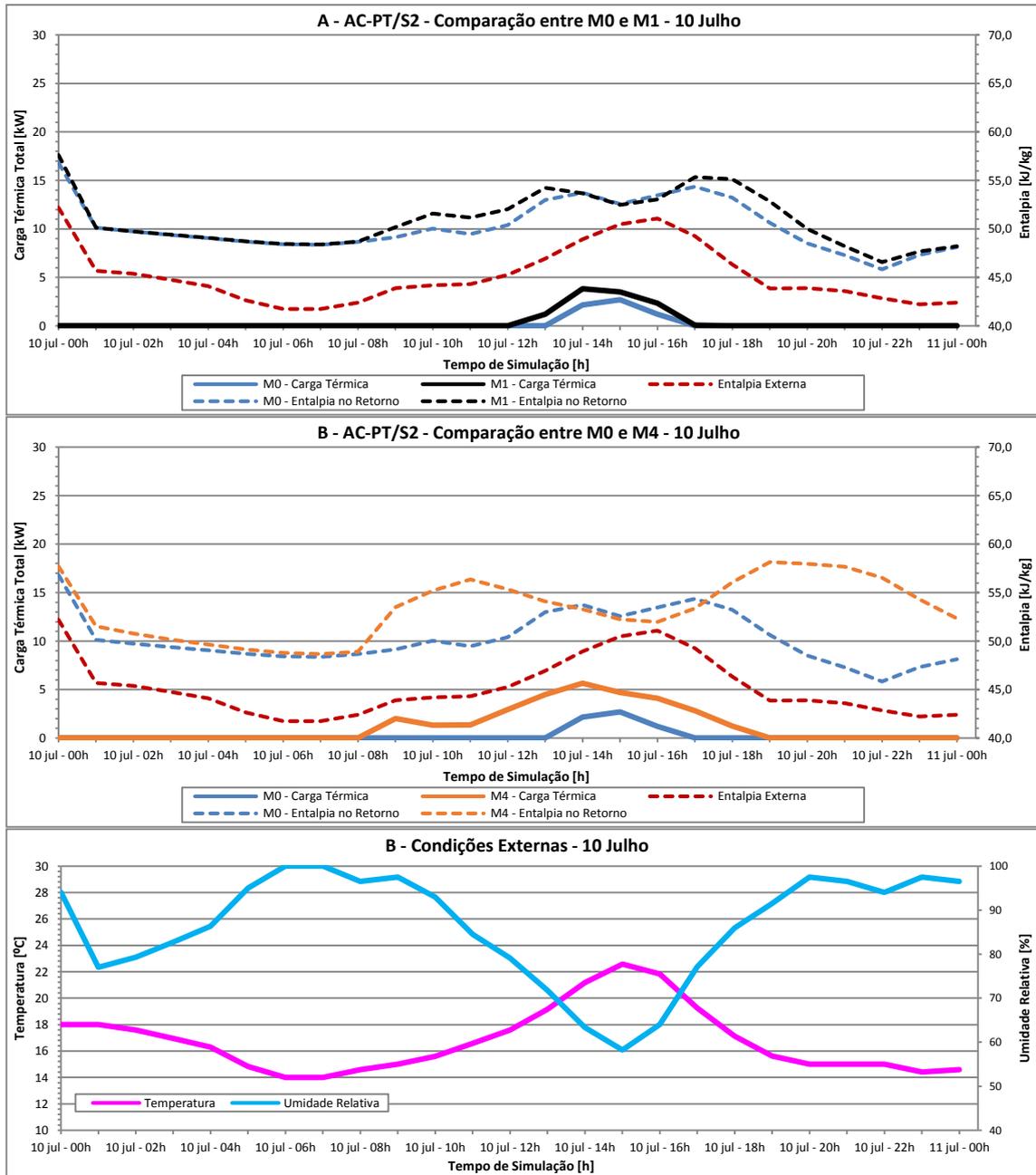


Figura 5.41: Inversão de carga térmica para as entalpias interna e externa no sistema AC-PT/S2 e condições ambientais em 10 de julho.

Portanto, conforme mostraram as simulações, os resultados desejados de redução no consumo não foram atingidos não apenas em situações de meia estação. Ao longo de todo o ano, mesmo no verão, a economia de energia não foi atingida devido a variações nas condições climáticas diárias. Dessa forma, apenas nos momentos mais quentes do dia, em geral das 10 horas às 18 horas, a técnica DCV irá permitir resultados positivos. Mesmo nesses períodos, com relação ao consumo à taxa constante de ventilação exigida em norma (Modelo M1), a economia de energia com o uso do DCV será pequena em ambientes com ocupação uniforme ao longo do dia.

Com exceção ao horário de almoço, a ocupação nos ambientes está próxima do valor máximo na maior parte do dia e uma maior redução na ventilação acarretaria comprometimento da qualidade do ar interno e desconforto para os ocupantes. Portanto, no início da manhã e no final do dia, deve-se usar o economizador de ar externo, que será responsável pela maior redução no consumo anual de energia.

5.4 Economizador de Ar Externo e DCV Combinados

A partir das análises anteriores, define-se dois novos cenários para a avaliação da técnica de Ventilação Sob Demanda (DCV) combinada com o Economizador de Ar Externo (EAE), cada qual a ser aplicada em momentos distintos do dia, conforme as condições externas permitirem. Como base de comparação para as novas análises, denomina-se Cenário C0 ao conjunto de resultados obtidos até o momento, com a aplicação individual do controle DCV. Assim, pode-se confrontar os resultados de carga térmica e consumo, dentro de cada modelo, com os resultados gerados pelas simulações dos novos cenários, descritos a seguir.

O primeiro novo Cenário, chamado Cenário C1, consiste no EAE com controle diferencial de temperatura de bulbo seco, que pode aplicar a vazão de ar externo máxima quando a temperatura de bulbo seco do ar externo for menor que a do ar interno. Caso contrário, nos momentos em que a temperatura externa for maior que a interna, o controle do ar externo será feito pelo controlador DCV.

O segundo novo Cenário, chamado Cenário C2, consiste no EAE baseado na estratégia de controle diferencial de entalpia, que aplica a vazão máxima de ar externo quando a entalpia do ar externo for menor que a do ar interno. Por outro lado, se a entalpia do ar externo for maior que a do ar interno, o controle do ar de renovação será efetuado pelo controlador DCV.

A Tabela 5.3 mostra um sumário dos Cenários considerados nas análises a seguir.

Tabela 5.3: Cenários de aplicação do EAE, combinado com o DCV.

Id	Cenário	Estratégia
C0	Cenário 0	Sem Economizador de Ar Externo
C1	Cenário 1	Controle Diferencial de Temperatura de Bulbo Seco
C2	Cenário 2	Controle Diferencial de Entalpia

Todas as demais características dos Modelos da Tabela 5.1 e dos sistemas da Tabela 5.2 permanecerão inalteradas, exceto as vazões de renovação de ar máximas, que serão definidas iguais aos do Modelo M0 (100%), para todos os demais Modelos. Lembrando que a vazão de ar externo que é fixa em 100% no Modelo M0, poderá ser modulada entre 0% e 100% nos novos Cenário, tanto pelo EAE como pelo DCV, para garantir as condições de conforto e reduzir o consumo de energia. A Tabela 5.4 mostra os dados de entrada para os controladores da ventilação de ar externo, objetos da Classe *Controller:OutdoorAir*.

Tabela 5.4: Vazões de ar externo máximas e mínimas para os novos Cenários.

Cenário	Vazão AE	M0	M1	M2	M2	M4	M5
C0	Máxima	100%	Mínimo de Norma				
	Mínima	100%	Mínimo de Norma	0%	0%	0%	0%
C1	Máxima	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Mínima	100%	Mínimo de Norma	0%	0%	0%	0%
C2	Máxima	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Mínima	100%	Mínimo de Norma	0%	0%	0%	0%

Serão apresentados os resultados com base na economia de energia e nas condições de conforto no interior dos ambientes, para os novos Cenários. Em seguida, serão feitas considerações e análises adicionais com base no impacto que o EAE causa na umidade relativa interna, principalmente para a estratégia do controle diferencial de temperatura, no Cenário C1.

5.4.1 Controle Diferencial de Temperatura

O EAE baseado na estratégia do controle diferencial de temperatura, conforme explicado na seção anterior, reduz a vazão de ar externo para renovação ao mínimo, quando a temperatura do ar externo é maior que a temperatura do ar interno. Para o AC-PT/S2, que atende a zona Convivência, a Figura 5.42 mostra o Modelo M1 no dia 08 de janeiro, onde a vazão mínima de ar externo é a especificada em ABNT (2008c), conforme mostrado na Tabela 5.4.

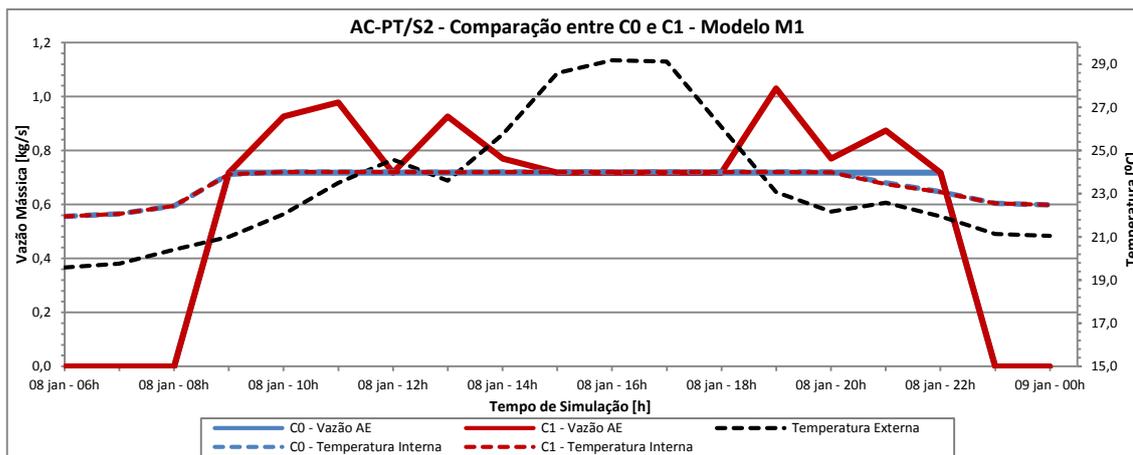


Figura 5.42: Variação da vazão de ar externo e temperatura interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de temperatura, no AC-PT/S2 - Modelo M1.

Para o Cenário C0, essa vazão mínima é constante ao longo do dia todo, representada pela curva azul cheia, sem a ação do DCV. Por outro lado, a curva vermelha cheia mostra a variação da vazão de ar externo pela ação do controlador EAE, no Cenário C1. Observa-se que até pouco antes das 10 horas, o sistema opera com alta vazão de ar externo, que é reduzida quando a temperatura externa, representada pela curva preta tracejada, ultrapassa as curvas tracejadas azul e vermelha (praticamente sobrepostas), que representam respectivamente, as temperaturas internas no Cenário C0 e no Cenário C1. Na sequência, observa-se que a oscilação da temperatura externa faz com que a vazão de ar de renovação seja aumentada e, em seguida diminuída, permanecendo no valor mínimo de norma ao longo do período mais quente do dia.

Finalmente, após as 18 horas, a temperatura externa torna-se menor que a interna e o sistema passa a operar com 100% de ar externo novamente. Com relação ao conforto térmico, é interessante notar, também da Figura 5.42, que apesar do sistema utilizar alta vazão de ar externo, para a condição de verão do dia 08 de janeiro, a diferença entre as temperaturas internas nos cenários C0 e C1 é muito pequena.

De forma similar, a Figura 5.43 mostra a comparação entre o Cenário C0 e o Cenário C1 no Modelo M4, também para o AC-PT/S2. Observa-se que a oscilação da temperatura externa representada pela curva preta tracejada, causa uma variação muito maior na vazão de ar externo no Modelo M4 que no Modelo M1 da Figura 5.42. No caso do Modelo M4, não existe um valor mínimo para a vazão de ar de renovação, que é determinada pelo controlador DCV. E como o sistema operou com alta vazão de ar externo no início da manhã, a concentração interna de CO₂ permaneceu baixa. Dessa forma, quando a temperatura externa torna-se maior que 24 °C e o controlador DCV assume o comando, a vazão de ar externo pode ser reduzida a zero, como ocorreu às 11 horas da manhã, sem prejuízo à qualidade do ar interior.

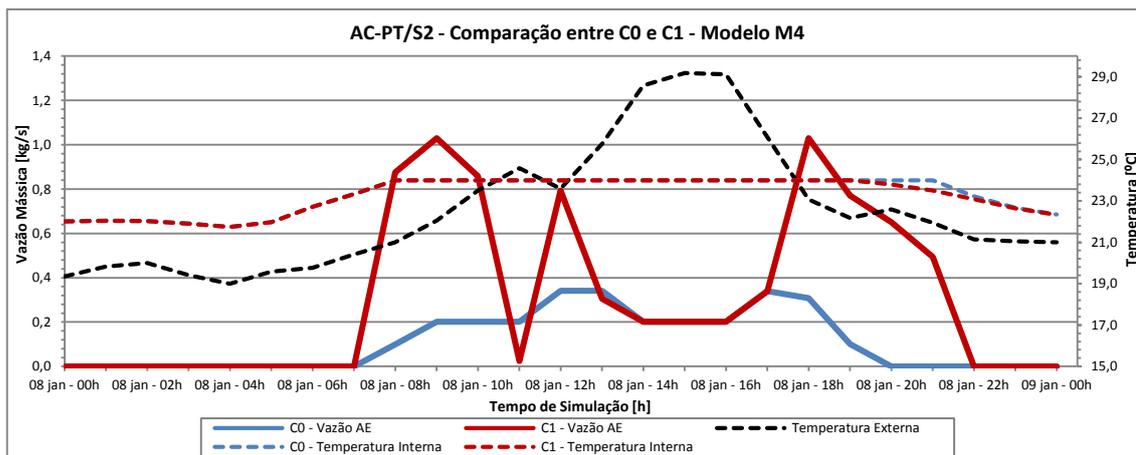


Figura 5.43: Variação da vazão de ar externo e temperatura interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de temperatura, no AC-PT/S2 - Modelo M4.

Vale ressaltar que para o equipamento AC-PT/S2, mostrado na Figura 5.42 e na Figura 5.43, a vazão mínima de ar externo especificada em norma corresponde a aproximadamente 60% da vazão de insuflação máxima, pois este sistema atende o ambiente Convivência que possui ocupação intensa, similar à de um auditório, ao longo de todo o dia.

Para o equipamento AC-P1/S2, que atende as zonas Engenharia e TI do Pavimento 1, conforme mostra a Tabela 5.2, o comportamento do controlador EAE foi bastante similar, apesar das diferenças de ocupação dos ambientes, que neste caso, tratam-se de escritórios típicos. A Figura 5.44 mostra a atuação do EAE sem o controle DCV no Modelo M1, onde a vazão de ar externo nunca é menor que o valor mínimo de norma. E a Figura 5.45 mostra o EAE em conjunto com o DCV no Modelo M4.

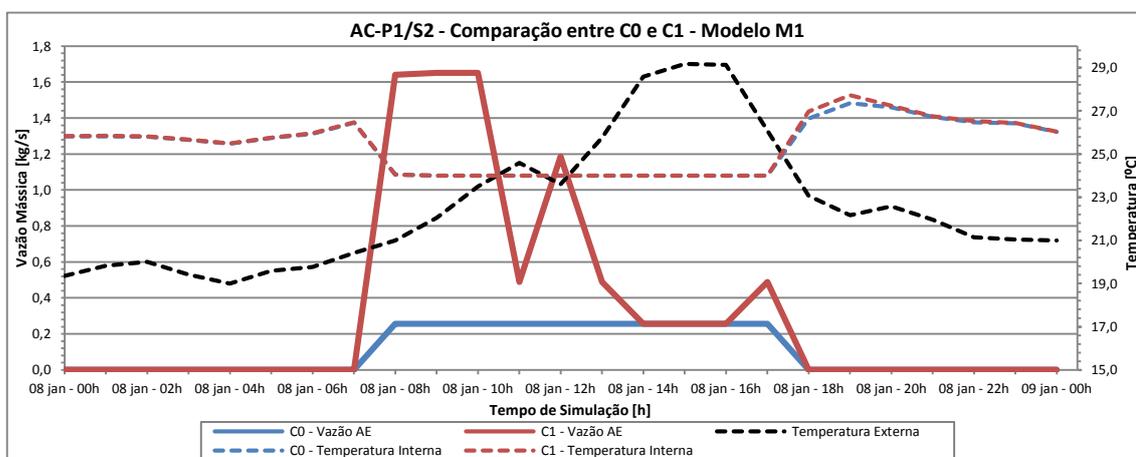


Figura 5.44: Variação da vazão de ar externo e temperatura interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de temperatura, no AC-P1/S2 - Modelo M1.

No caso da Figura 5.45, observa-se que o uso combinado do EAE e do DCV pode proporcionar economia de energia inclusive nos momentos mais quentes do dia, com uma vazão de ar externo menor que a aplicada pelo DCV, como ocorreu por volta das 14 horas.

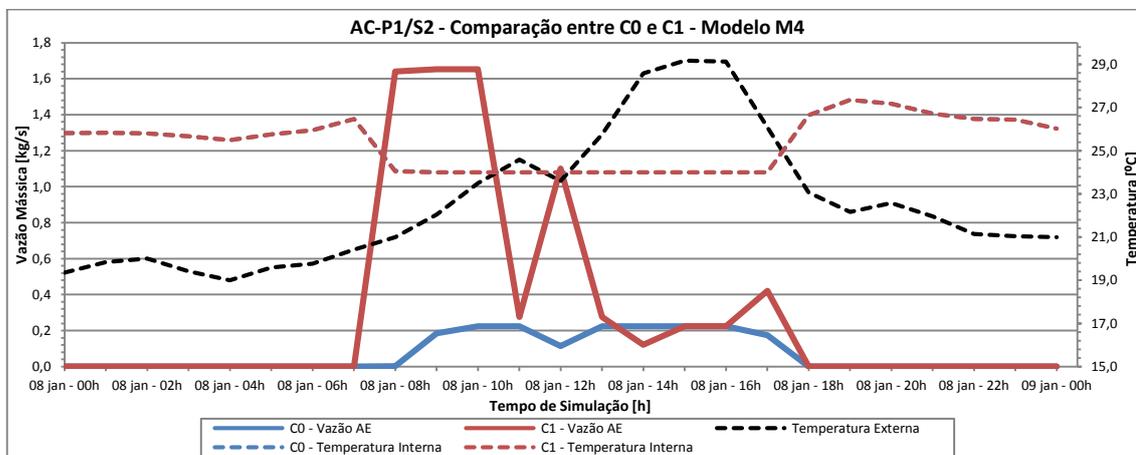


Figura 5.45: Variação da vazão de ar externo e temperatura interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de temperatura, no AC-P1/S2 - Modelo M4.

Isso é possível pois, quando ocorre uma momentânea queda na temperatura externa, o controlador EAE aumenta a vazão de ar externo e limpa os contaminantes do ambiente interno. Dessa forma, quando a temperatura externa volta a subir e o comando passa para o controlador DCV, a vazão de renovação pode ser reduzida até que a concentração de CO₂ atinja novamente o valor configurado, que neste caso é de 1.100 ppm.

5.4.2 Controle Diferencial de Entalpia

O EAE baseado na estratégia do controle diferencial de entalpia, conforme explicado na seção anterior, aumenta a vazão de ar externo para renovação ao máximo, quando a entalpia do ar externo é menor que a entalpia do ar interno (retorno). Para o AC-PT/S2, na zona Convivência, a Figura 5.46 mostra o Modelo M1 no dia 08 de janeiro, onde a vazão mínima de ar externo é a especificada em ABNT (2008c).

Observa-se que no início da manhã e no final do dia, quando as condições externas permitem, o controlador EAE aumenta a vazão de ar externo ao máximo, fazendo a hiperventilação do edifício e reduzindo o consumo de energia. Quando a entalpia do ar externo sobe e torna-se maior que a entalpia do ar interno, a taxa de ventilação volta a ser a especificada em norma.

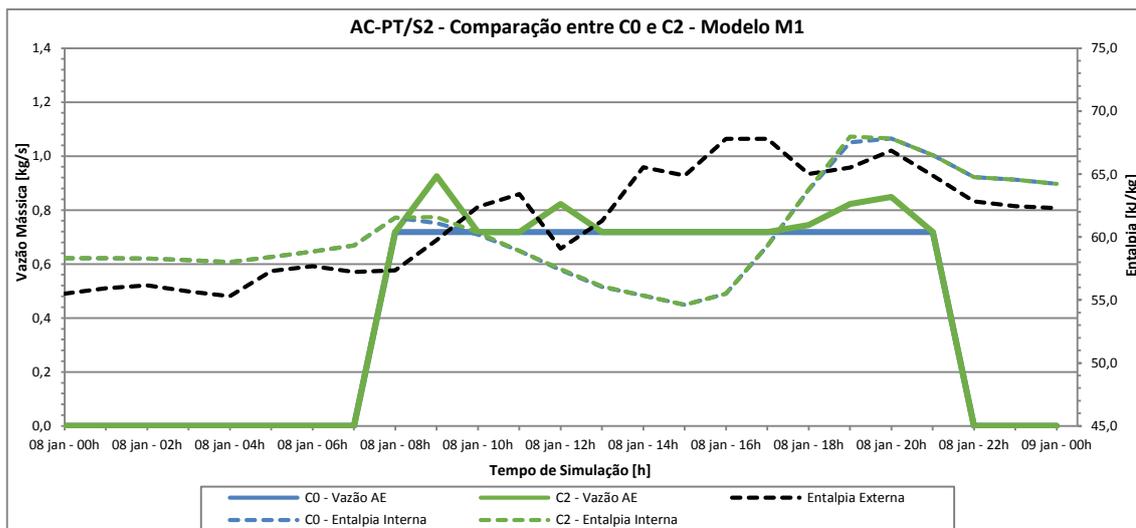


Figura 5.46: Variação da vazão de ar externo e entalpia interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de entalpia, no AC-PT/S2 - Modelo M1.

Para o Modelo M4, conforme mostra a Figura 5.47, no início da manhã o controlador DCV hiperventila o edifício de forma similar ao controle diferencial de temperatura, porém, praticamente ao longo de todo o restante do dia, a entalpia interna fica abaixo da externa e o controle da ventilação é feito pelo controlador DCV. Isso ocorre pois, conforme se mostrou na Seção 5.3.2, a entalpia do ar interno diminui conforme se reduz a vazão de ar externo.

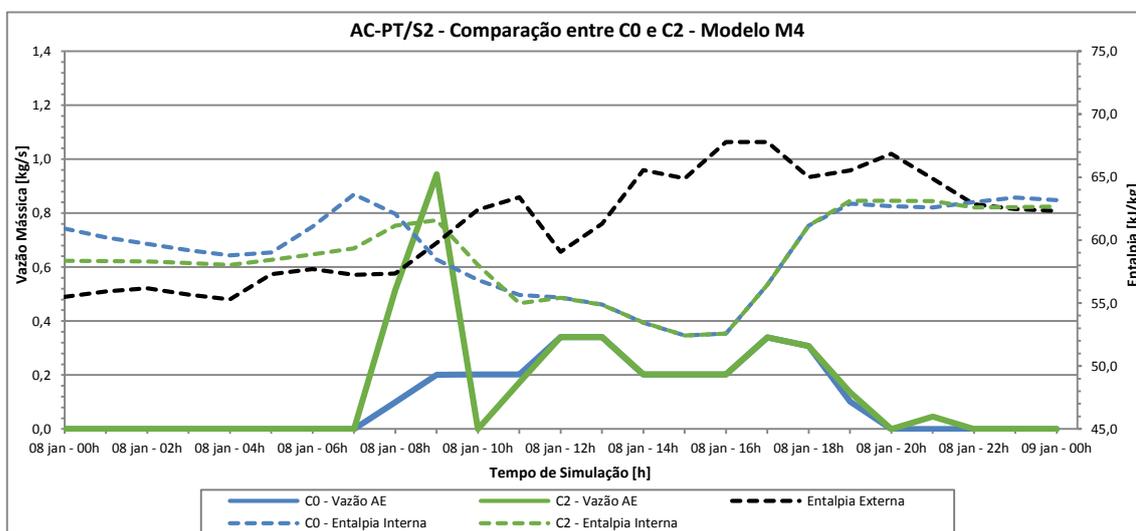


Figura 5.47: Variação da vazão de ar externo e entalpia interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de entalpia, no AC-PT/S2 - Modelo M4.

Para o AC-P1/S2, zonas Engenharia e TI do Pavimento 1, conforme mostra a Figura 5.48, o controle diferencial de entalpia atua de forma similar ao AC-PT/S2, no Modelo M1. Ou seja, o controlador EAE atua apenas no início da manhã enquanto no restante do dia, a taxa de ventilação de ar externo é a especificada em norma.

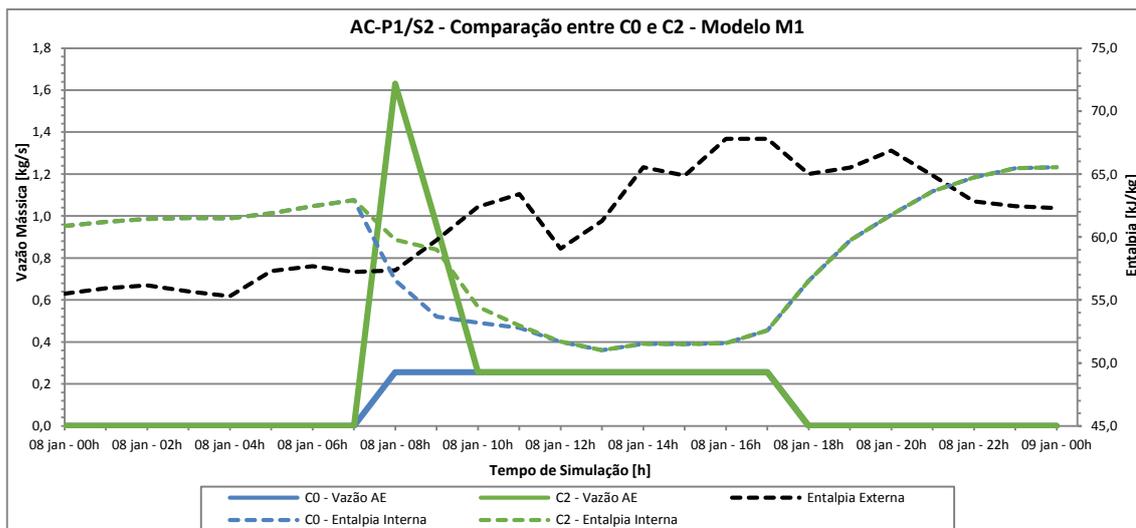


Figura 5.48: Variação da vazão de ar externo e entalpia interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de entalpia, no AC-P1/S2 - Modelo M1.

Para o Modelo 4, também no AC-P1/S2, conforme mostra a Figura 5.49, o controlador EAE se comportou de forma similar aos sistemas anteriores, entrando em operação apenas pela manhã, e passando o controle ao DCV ao longo do restante do dia.

Dessa forma, pelos resultados obtidos, deve-se avaliar se o investimento em um controle de ventilação combinado entre DCV e EAE é economicamente interessante, pois poderão ocorrer situações em que o aumento da vazão de ar externo seja possível apenas em alguns poucos momentos ao longo do ano, não levando a uma economia substancial de energia, dependendo da localidade. No caso deste trabalho, conforme será mostrado na próxima seção, a combinação do EAE com o DCV levou a resultados interessantes.

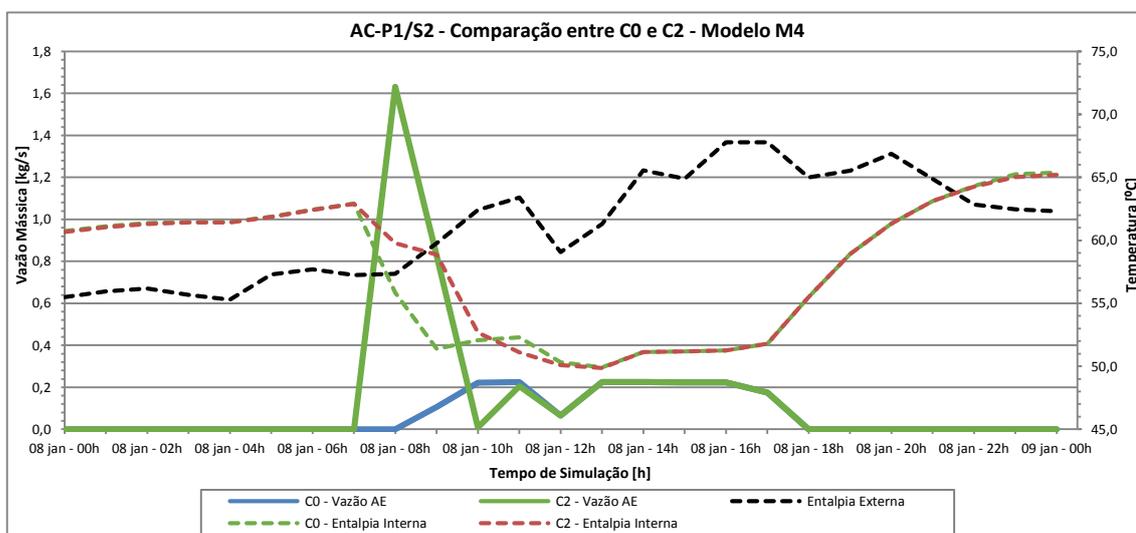


Figura 5.49: Variação da vazão de ar externo e entalpia interna pela ação combinada do DCV e EAE com controle diferencial de entalpia, no AC-P1/S2 - Modelo M4.

5.5 Consumo de Energia com EAE

Conforme se observou anteriormente, a aplicação do DCV causa um “achatamento” da curva de carga térmica com relação à curva do Modelo M0, no Cenário C0. Ou seja, o pico de carga térmica diminui com a aplicação do DCV pela redução da vazão de ar externo nos momentos mais quentes do dia. Por outro lado, a técnica causa um aumento da carga térmica no início da manhã e final da tarde, pois a diminuição da vazão de renovação nestes momentos faz com que o sistema deixe de aproveitar o potencial do ar externo de promover o resfriamento gratuito.

Dessa forma, o objetivo de se combinar o DCV com o EAE, é reduzir a carga térmica pela manhã e pela tarde a valores próximos aos do Modelo M0, e reduzir a carga térmica nos momentos centrais do dia a valores próximos aos do DCV. Conforme se pode notar pela Figura 5.50 e pela Figura 5.51, que mostram a carga térmica e a vazão de ar externo pela ação combinada do DCV e do EAE, de forma geral esse objetivo foi cumprido.

Nestas figuras, as curvas cheias representam as cargas térmicas e as curvas tracejadas as vazões de ar externo, sendo a cor azul sempre se referindo ao Cenário C0, a preta ao Cenário C1 e a verde ao Cenário C2. No caso do Modelo M0, na Figura 5.50-A e na Figura 5.51-A, os Cenários C1 e C2 apresentaram resultados idênticos ao Cenário C0 visto que este modelo opera apenas à vazão máxima de 100% de ar externo. E seus valores de carga térmica e consumo serão a referência nas análises seguintes, pois este modelo levou ao menor consumo anual de energia no Cenário C0.

O equipamento AC-PT/S2, que atende à zona única do Centro de Convivência, é mostrado na Figura 5.50. Observa-se que neste sistema, para o Modelo M1 (Figura 5.50-B), a aplicação do EAE já mostra resultados e varia consideravelmente a vazão de ar externo de manhã e à tarde, conforme já foi mostrado na seção anterior. No restante do dia, a vazão de renovação é a especificada em norma, sem uso do DCV. Porém, quanto à carga térmica, neste dia em particular, os resultados dos cenários C1 e C2 foram bastante parecidos com os resultados do Cenário C0.

Para os modelos com DCV (M2, M3, M4 e M5), os sistemas podem operar entre 0% e 100% de ar externo, com a vazão mínima sendo determinada pelo controlador DCV.

Como se observa na Figura 5.50, para todos os Modelos, o pico de carga térmica ficou igual ao do Cenário C0 e houve redução no início da manhã e final da tarde, mesmo que esta redução tenha sido pequena em alguns Modelos.

Pela manhã, mesmo com variações significativas na vazão de ar externo, as cargas térmicas nos cenários C1 e C2 foram bastante parecidas, e menores que no Cenário C0, para os modelos com DCV. No final da tarde, porém, cada Modelo teve comportamentos diferentes.

No Modelo M1, o EAE foi ativado tanto em C1 como em C2, em intensidades diferentes, mas a carga térmica teve comportamento similar nos três Cenários, conforme se nota pela Figura 5.50-B. Nos Modelos M2 e M5, mostrados nas Figuras Figura 5.50-C e Figura 5.50-F, o controle de entalpia do Cenário C2 aumentou a vazão de ar externo apenas nas últimas horas de funcionamento dos sistemas, enquanto o controle de temperatura utilizou alta vazão por maior período e levou a reduções consideráveis na carga térmica.

Para o Modelos M3, Figura 5.50-D, a vazão de ar externo é maior que em M2 e M5 pois, como não existe mais uma limitação na vazão de ar externo, e esta pode chegar a 100%, o controlador DCV é capaz atender ao *setpoint* de 700 ppm. Assim, a vazão mínima definida pelo DCV é maior, aumentando a entalpia interna e mudando as condições do ar no retorno do equipamento, o que permite ao EAE permanecer ativado por maior tempo no Cenário C2.

Quanto ao Modelos M4, conforme Figura 5.50-E, a curva de vazão de C2 acompanha a de C0 e apenas para o Cenário C1 o sistema utilizou alta vazão de ar externo, permanecendo o EAE desativado no Cenário C2. Ou seja, a entalpia do ar interno permaneceu abaixo da entalpia do ar externo e o comando ficou com o DCV, devido à maior desumidificação do ar obtida neste Modelo. Estes resultados são consistentes com aqueles apresentados na Seção 5.4.2, onde se observou que a redução da vazão de ar externo pela ação do DCV diminui a entalpia interna, fazendo com que o EAE por controle de entalpia não atue.

Além das diferenças nas condições internas do ambiente, o uso do controle diferencial de entalpia em si leva a um menor uso do EAE em São Paulo, pois de forma geral, o clima nessa localidade é bastante úmido. Dessa forma, devido à diferença física entre os parâmetros fundamentais de controle das duas filosofias, em um mesmo momento a temperatura de bulbo seco externa está abaixo da interna, enquanto a entalpia externa está acima da interna. Neste momento, o controle com base na temperatura aumenta a vazão de ar externo enquanto o controle com base na entalpia, o diminui.

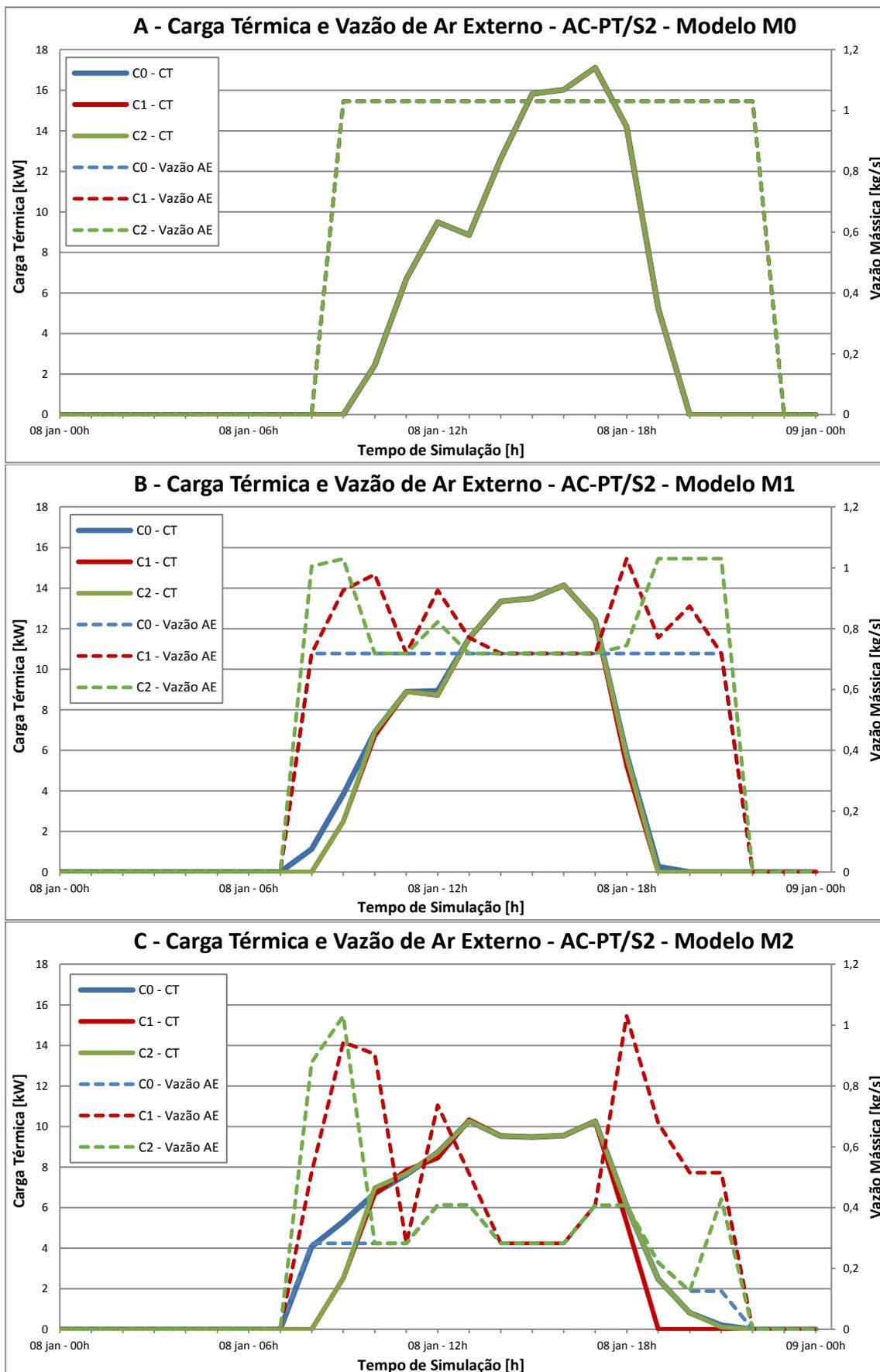


Figura 5.50: Carga térmica e vazão de ar externo pela ação combinada do DCV e EAE no AC-PT/S2.

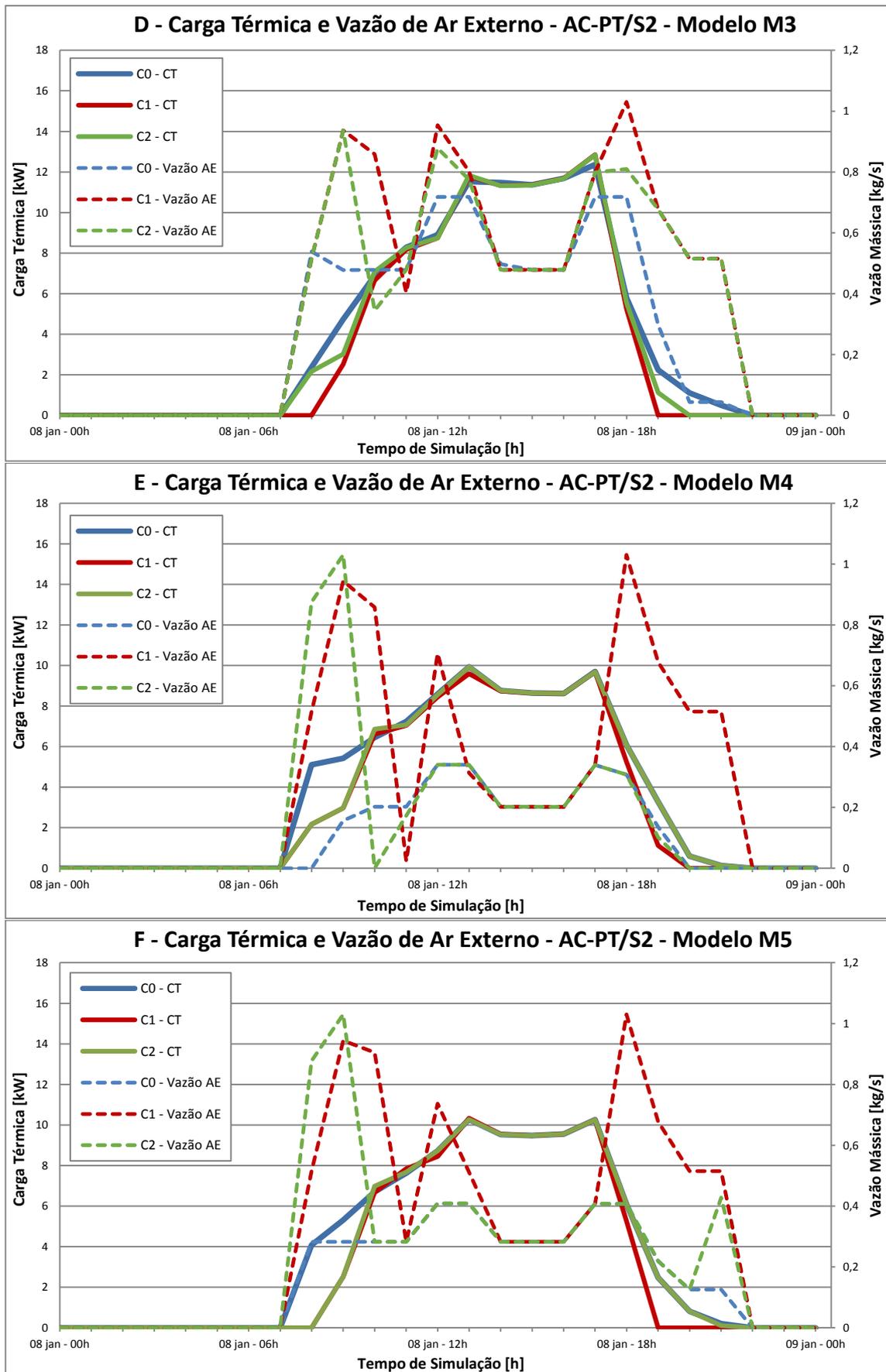


Figura 5.50: Carga térmica e vazão de ar externo pela ação combinada do DCV e EAE no AC-PT/S2. (Continuação)

Para o AC-P1/S2, mostrado na Figura 5.51, o comportamento geral para o Cenário C1 foi bastante parecido com o do AC-PT/S2 mostrado anteriormente. Já no caso do Cenário C2, conforme já foi comentado Seção 5.4.2 com relação ao M4, para os modelos com DCV o EAE atuou por menos tempo e o comportamento do consumo no Cenário C2 ficou parecido com o comportamento do Cenário C0. Observa-se que tal fato ocorreu em todos os Modelos, com exceção de M3, ficando o consumo do Cenário C2 igual parecido com o do Cenário C1.

Com relação ao Modelo M3, conforme a Figura 5.51-D, o comportamento diferente da vazão de ar externo no final da tarde se deve ao controlador DCV e não ao EAE. Como já foi dito, com o limite de ar externo igual ao valor máximo de insuflação do sistema, o DCV é capaz de atingir 700 ppm para a concentração interna de CO₂. Dessa forma a vazão de ar externo desse Modelo é maior praticamente ao longo do dia todo.

Portanto, em todos os Modelos, o controlador EAE com base no diferencial de entalpia habilitou a vazão de ar externo máxima por menos tempo no equipamento AC-P1/S2, mostrado na Figura 5.51, no dia 08 de janeiro. Considerando que as condições externas são as mesmas para a análise da Figura 5.50, feita anteriormente, pode-se concluir que tal fato decorre, mais uma vez, das mudanças nas condições internas, medidas pelo controlador EAE no retorno do equipamento.

Como o sistema AC-P1/S2 atende ambientes de escritório, como a Engenharia e a TI, a intensidade de ocupação (em pessoas por m²) é menor que na Convivência. Conseqüentemente, a umidade gerada pelo metabolismo das pessoas é menor e a vazão mínima de ar externo requerida por norma também é menor. Dessa forma, o sistema opera com menor carga térmica latente, e controla melhor a umidade relativa interna, fazendo com que a entalpia do ar no retorno seja menor que em AC-PT/S2. Portanto, o período em que o controle diferencial de entalpia utiliza a vazão máxima de ar externo é menor.

Quanto ao cenário C1, é interessante notar que em alguns momentos sua carga térmica (representada pela curva preta cheia), foi maior que no Cenário C0 (curva azul cheia). Isso ocorreu devido ao maior período de habilitação do EAE com base na temperatura de bulbo seco. Devido atraso na resposta térmica do sistema, no momento em que a temperatura externa torna-se maior que a interna, já ocorreu um considerável aumento na carga térmica dos ambientes. Esta situação se agrava particularmente nos momentos em que as condições externas mudaram rapidamente, e o sistema tenta se adaptar variando a vazão de renovação.

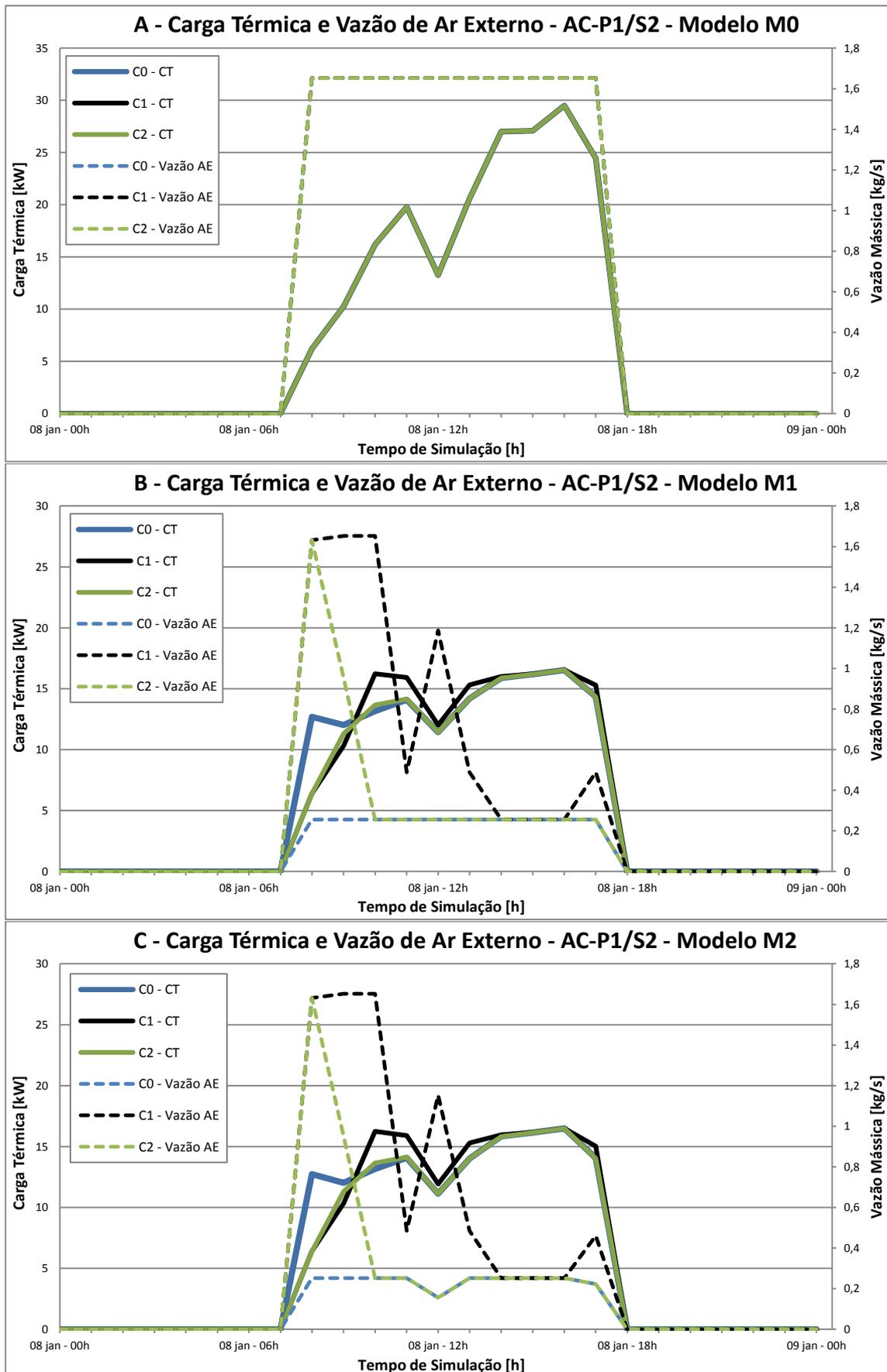


Figura 5.51: Carga térmica e vazão de ar externo pela ação combinada do DCV e EAE no AC-P1/S2.

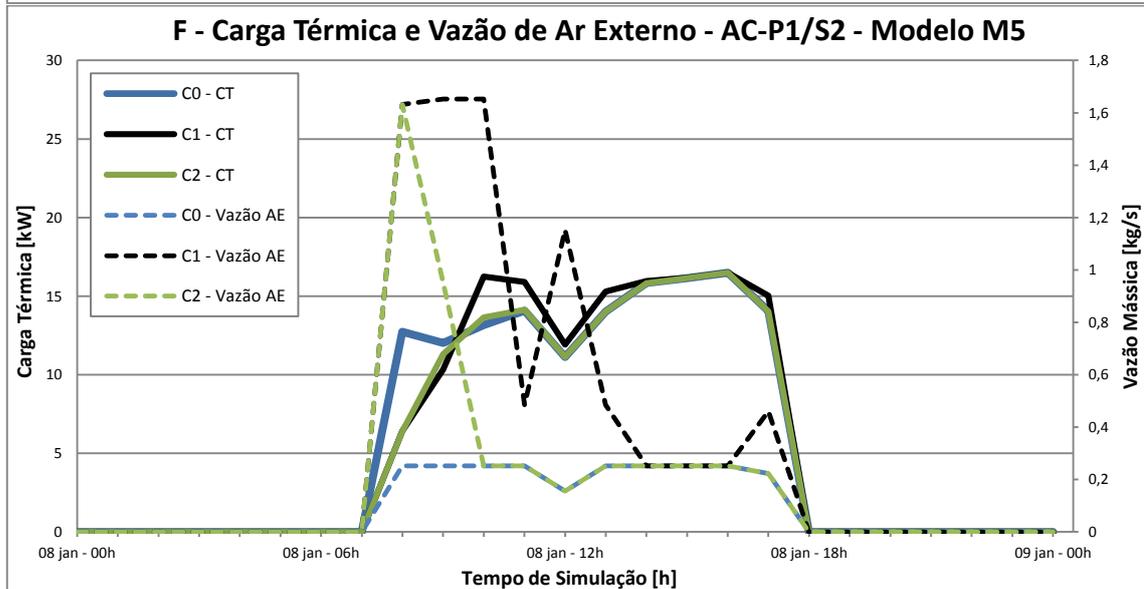
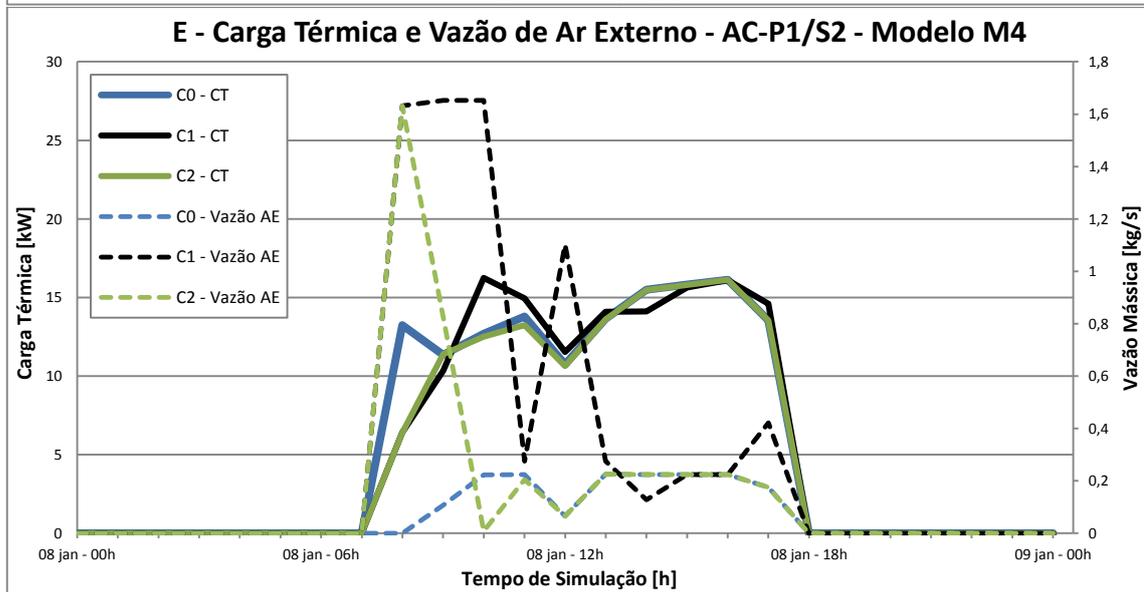
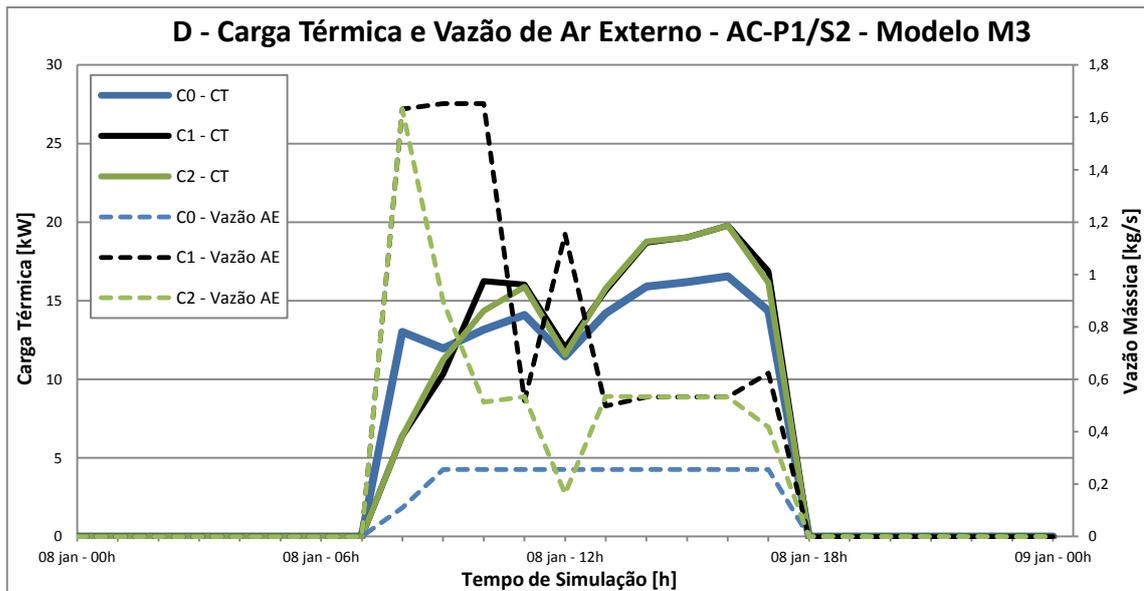


Figura 5.51: Carga térmica e vazão de ar externo pela ação combinada do DCV e EAE no AC-P1/S2. (Continuação)

As considerações feitas para as figuras anteriores são válidas apenas para o dia 08 de janeiro e uma infinidade de outras combinações de variáveis climáticas ocorreram ao longo do ano, afetando o comportamento do sistema. Assim, condições particulares como estas são interessantes para se observar o comportamento do sistema frente às condições climáticas. Sem mais pormenores, serão analisados agora os impactos da aplicação do EAE no consumo global dos modelos.

A Figura 5.52, mostra a evolução do consumo mensal de energia elétrica nas unidades condensadoras, que inclui o compressor e o ventilador do condensador, do equipamento AC-P1/S2. Observa-se que para o Cenário C0 (Figura 5.52-A, já apresentada na Seção 5.2), todos os modelos tiveram consumo maior que o Modelo M0 na maior parte do ano, com exceção apenas dos meses de verão.

Já com a aplicação do EAE, nos cenários C1 e C2, conforme mostra a Figura 5.52-B e a Figura 5.52-C respectivamente, além de se obter redução no consumo para os meses de verão, em todos os demais meses o consumo dos Modelos foi parecido com o consumo do Modelo M0. Portanto, a aplicação combinada do EAE com o DCV proporcionou redução no consumo de energia elétrica ao longo do ano todo e constitui-se em uma interessante opção para a redução de consumo em edifícios comerciais.

Considerando apenas o consumo de energia, para as condições climáticas da cidade de São Paulo, o controle diferencial da temperatura de bulbo seco levou a melhores resultados quando comparado ao controle diferencial de entalpia, conforme se pode observar da Figura 5.52-B.

Porém, levando-se em conta também as condições de conforto, conforme será visto na próxima seção, o controle diferencial de entalpia levou a melhores resultados, permitindo um melhor controle da umidade relativa interna. Tal fato ocorre principalmente nos sistemas que atendem ambientes com maior carga latente devido às características de ocupação e requisitos de ventilação de ar externo para higienização.

Nos sistemas AC-PT/S2 que atende o Centro de Convivência e no sistema AC-P1/S3 que atende o Auditório do Pavimento 1, o controle diferencial de temperatura não é a melhor opção, mesmo com menor consumo de energia. Pois a umidade relativa, que já fica alta ao longo do período de ocupação nesses ambientes, torna-se ainda maior com o uso do economizador de ar externo.

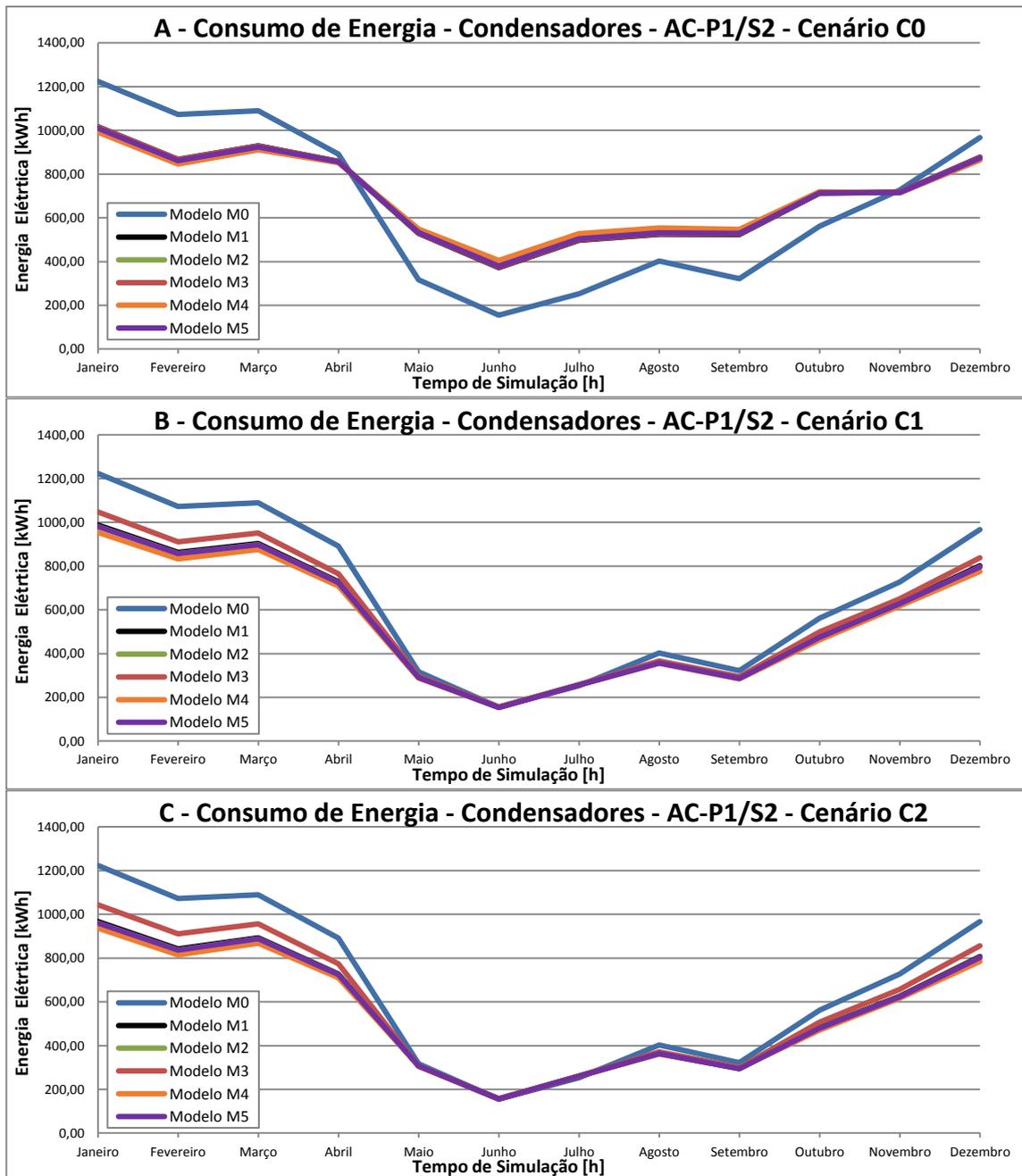


Figura 5.52: Consumo de energia nos compressores do AC-P1/S2, nos cenários considerados.

Quanto ao consumo anual, a Figura 5.53 mostra o desempenho de cada modelo, nos três cenários estudados neste trabalho. Observa-se que o consumo no Modelo M0 é igual nos três cenários, conforme explicado anteriormente, e fornece uma referência de comparação para o desempenho do EAE, que busca consumo similar ao do M0, porém com melhores condições internas. Na Figura 5.53-A, todos os modelos tiveram consumo anual maior que o do Modelo M0, e nas Figuras Figura 5.53-B e Figura 5.53-C, ocorreu o contrário. Observa-se também, que para o Cenário C1 (Figura 5.53-B), todos os modelos tiveram consumo menor que no Cenário C2, ratificando o melhor desempenho energético do controle diferencial de temperatura.

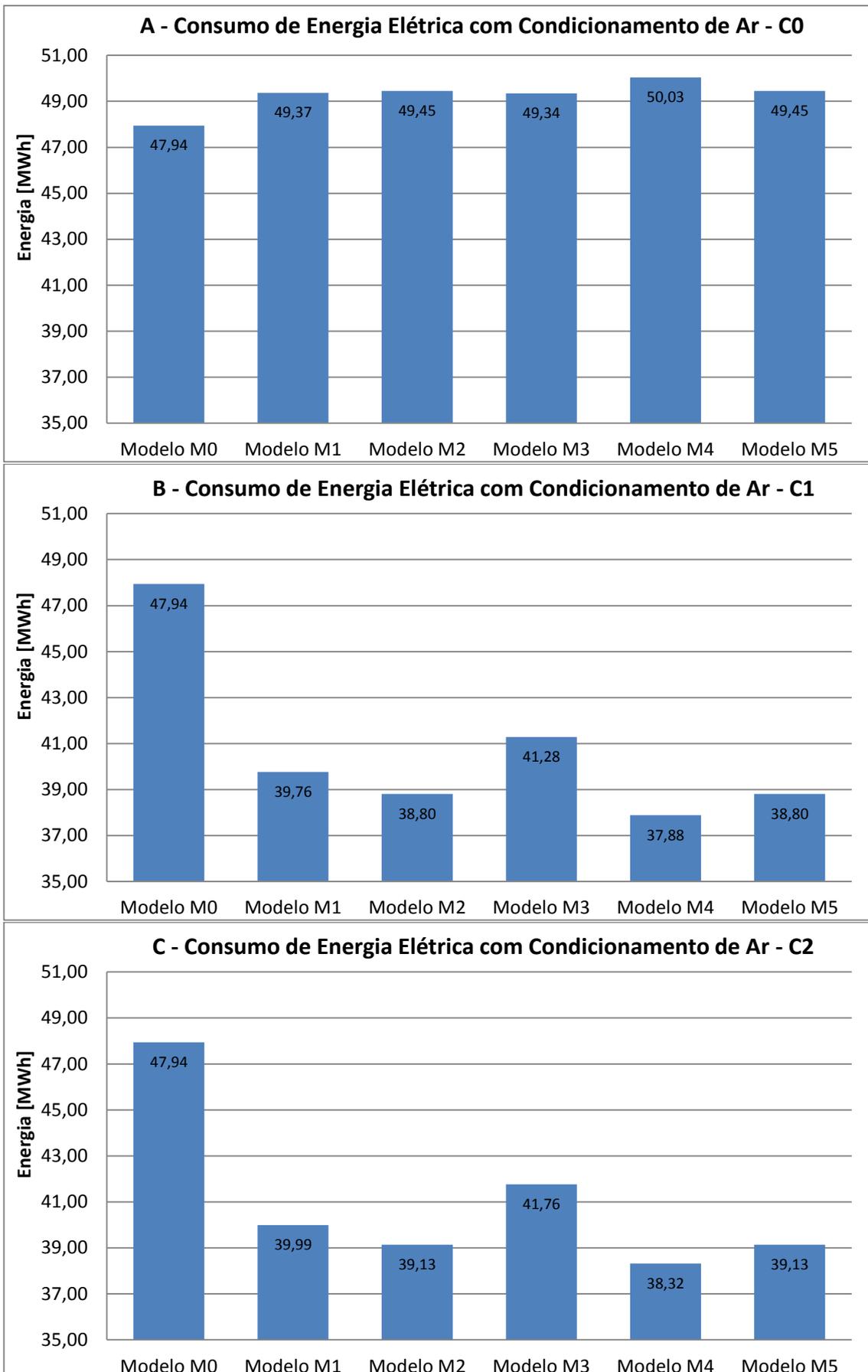


Figura 5.53: Consumo anual de energia elétrica com condicionamento de ar.

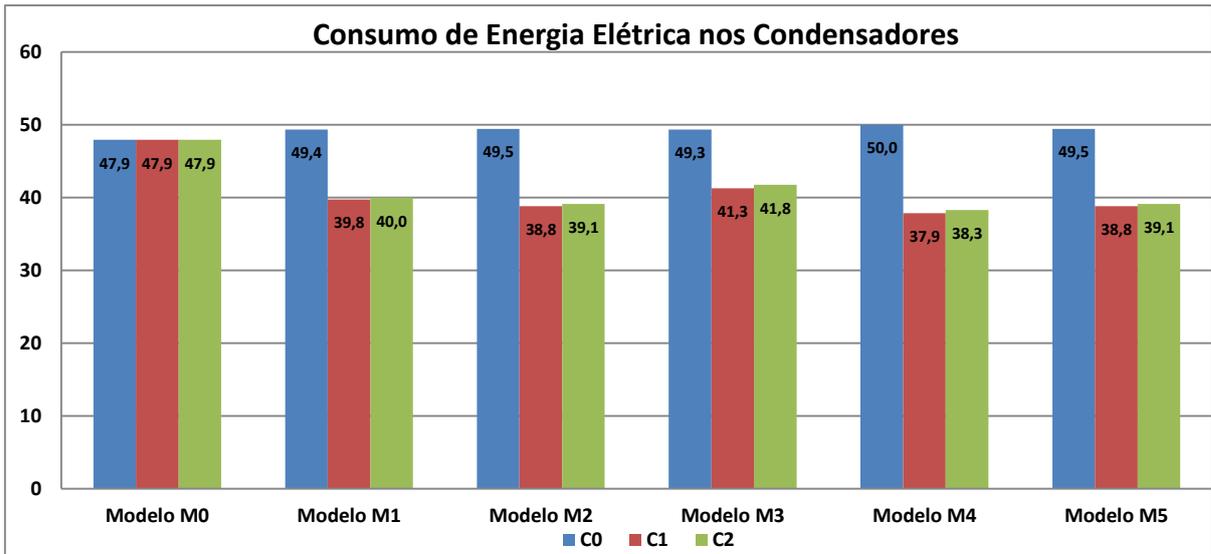


Figura 5.54: Consumo anual de energia elétrica nas unidades condensadoras.

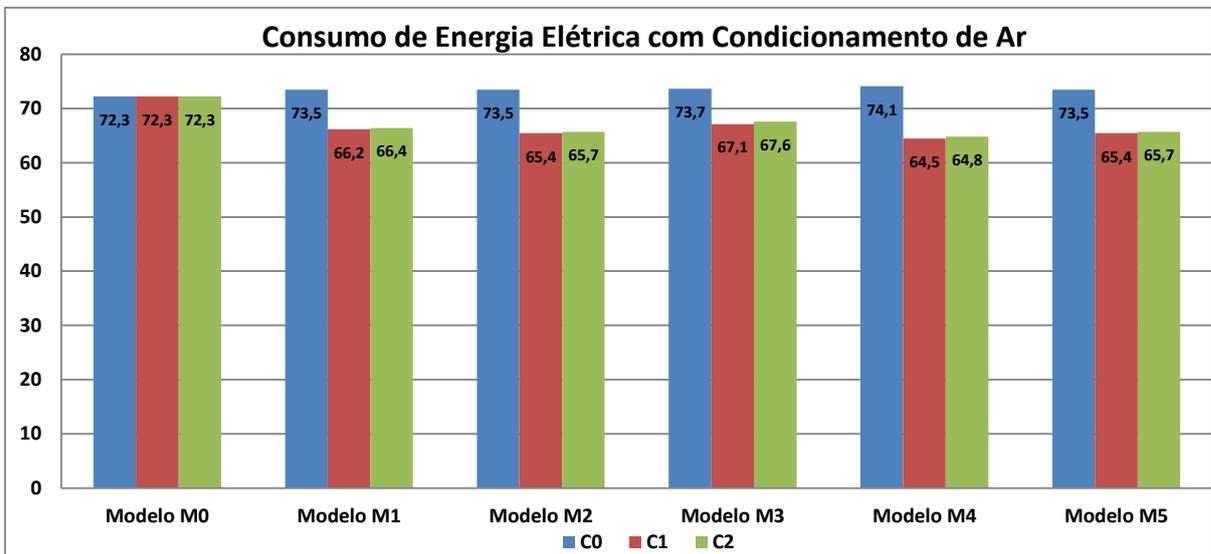


Figura 5.55: Consumo anual de energia elétrica com condicionamento de ar.

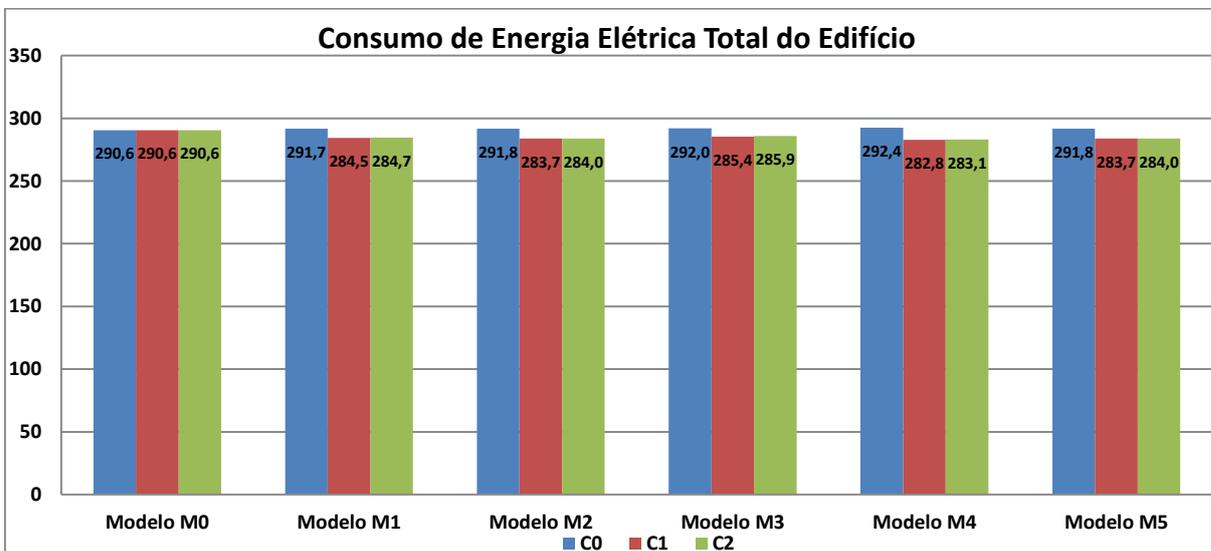


Figura 5.56: Consumo anual de energia elétrica total do edifício.

Finalmente, a Tabela 5.5 mostra um sumário dos resultados de consumo anual com condicionamento de ar, obtidos dentro dos cenários estudados, e as reduções percentuais de consumo obtidas em casa caso, com relação ao Modelo M1, Cenário C0, caso base.

Tabela 5.5: Consumo anual e economia percentual com relação ao Modelo M1.

Consumo de Energia Elétrica – Ar-Condicionado [MWh]						
Cenário	M0	M1	M2	M3	M4	M5
C0	72.27	73.45	73.49	73.66	74.12	73.49
	-1.60%	0.00%	0.05%	0.29%	0.90%	0.05%
C1	72.27	66.20	65.44	67.13	64.49	65.45
	-1.60%	-9.88%	-10.90%	-8.60%	-12.20%	-10.90%
C2	72.27	66.42	65.68	67.58	64.80	65.68
	-1.60%	-9.57%	-10.58%	-8.00%	-11.78%	-10.58%

Portanto, o melhor resultado de redução no consumo foi obtido no Modelo M4 para o Cenário C1, onde se combina a Ventilação Sob Demanda com base na concentração de CO₂ e o Economizador de Ar Externo com controle diferencial da temperatura de bulbo seco.

5.6 Condições de Conforto com EAE

Conforme as seções anteriores, as simulações computacionais em EnergyPlus, do edifício comercial objeto de estudo deste trabalho, atingiram o objetivo inicial de economia de energia através da combinação de duas técnicas conhecidas para controle da taxa de ventilação. Estas técnicas são a Ventilação Sob Demanda (DCV) com base na concentração de CO₂ e o Economizador de Ar Externo (EAE), com base no controle diferencial de temperatura e no controle diferencial de entalpia.

As figuras apresentadas nas Seções 5.4.1 e 5.4.2 mostram os resultados das simulações para, respectivamente, o Cenário C1 (DCV e EAE com controle diferencial de temperatura) e o Cenário C2 (DCV e EAE com controle diferencial de entalpia). Nas análises, se mostrou como os controladores DCV e EAE se alternam no comando da ventilação de ar externo, em função das variações ocorridas nas condições climáticas da cidade de São Paulo. Em seguida, os resultados com foco no consumo de energia foram apresentados na Seção 5.5. Porém, ainda não foram analisados os impactos que o EAE causa nas condições de conforto obtidas para o Cenário C0 (sem Economizador de Ar Externo), apresentadas nas Seções, 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3.

Nesta seção, portanto, serão mostrados esses impactos nas condições de conforto, bem como os possíveis efeitos adversos que podem decorrer da aplicação combinada do DCV com o EAE.

O dia 08 de Janeiro, para o qual foram feitas várias análises nas referidas seções anteriores, é particularmente favorável para a aplicação do EAE pois começou com temperaturas amenas (21,0°C às 8 horas da manhã, momento em que os sistemas entram em funcionamento), teve um alto pico de temperatura (29,1°C às 16 horas) e voltou a ter temperatura agradável no final da tarde (23,1°C às 18 horas, quando os sistemas são desativados).

Neste dia, para o Modelo M1, a Figura 5.57 mostra os impactos do EAE nas condições de conforto do ambiente Engenharia, e a atuação do controlador EAE, no Sistema AC-P1/S2. Pode-se notar que neste dia, o EAE teve influência praticamente nula na temperatura interna, onde as curvas cheias azul, preta e verde, que denotam respectivamente os Cenários C0, C1 e C2, se sobrepõem na Figura 5.57-A.

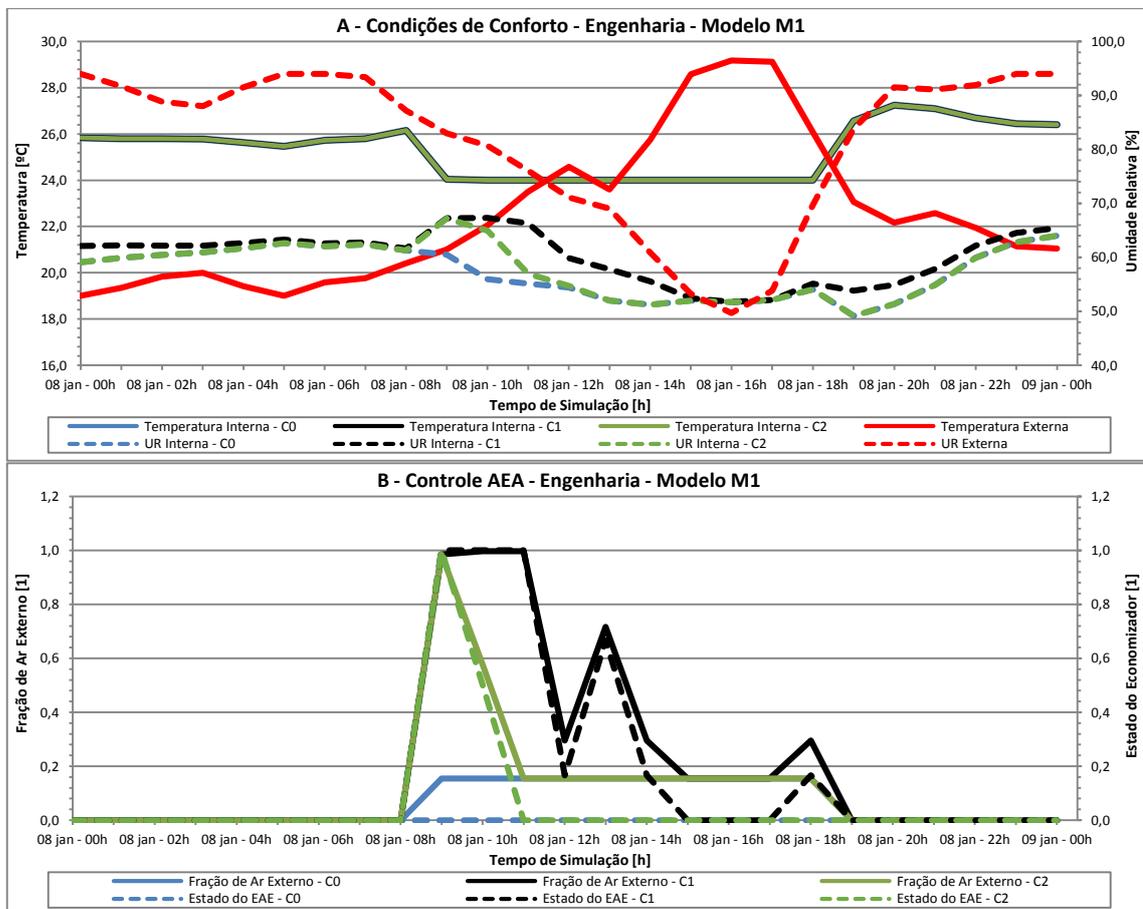


Figura 5.57: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Engenharia, sistema AC-P1/S2 - Modelo M1, em 08 de janeiro.

Da Figura 5.57-B, observa-se que o controle diferencial de temperatura do Cenário C1 utilizou a vazão máxima de ar externo (fração de ar externo igual a um, curva preta cheia) até as 11 horas da manhã, no dia 08 de janeiro, acompanhando as variações na temperatura externa mostrada pela curva vermelha cheia da Figura 5.57-A. Por outro lado, o controle diferencial de entalpia do Cenário C2, utilizou a fração de ar externo de 100% por tempo consideravelmente menor (curva verde cheia), permanecendo no valor de norma ao longo de todo o restante do dia.

A Figura 5.57-B, mostra no eixo vertical secundário, o sinal de controle do EAE que indica o estado do economizador, conforme curvas tracejadas azul, preta e verde. Valores iguais à unidade, nesta variável, denota economizador ativo e fração de ar externo igual a 100% e, por outro lado, zero denota economizador desativado. Segundo EnergyPlus (2013b), o estado do economizador é uma variável binária que só admite os valores 0 ou 1, porém como as variáveis são reportadas em base horária no EnergyPlus, valores médios intermediários podem ser mostrados.

O grande problema decorrente da aplicação do EAE, conforme os resultados obtidos neste e em outros trabalhos acadêmico, é o controle da umidade relativa nos ambientes internos, quando se usa alta vazão de ar externo. Em localidades de clima seco, o EAE pode causar desumidificação excessiva do ar interno e, por outro lado, em climas úmidos como o de São Paulo, a umidade pode ficar excessivamente alta.

Observa-se da Figura 5.57-A, que nos momentos em que os economizadores estiveram ativados (curva tracejada preta para C1 e verde para C2), a umidade relativa interna subiu consideravelmente com relação ao Cenário C0 (curva tracejada azul), em decorrência da alta umidade relativa externa, que estava em torno de 90% às 8:00 (curva tracejada vermelha). Observa-se também que o controle diferencial de entalpia possui melhor desempenho nesse sentido, e a umidade relativa interna fica mais próxima do Cenário C0. Simplesmente, a principal razão para isso conforme a Figura 5.57-B, é que o EAE permanece ativado por menor tempo no Cenário C2 que no Cenário C1, permitindo melhor controle da umidade e causando maior consumo de energia.

Deve ser ressaltado que o economizador minimiza o uso do compressor nos momentos em que as condições externas permitem. Dessa forma, ocorre uma menor desumidificação do ar e as condições internas se aproximam das externas. Portanto, obtém-se economia de energia às custas de um pior controle da umidade relativa dos ambientes internos.

A situação mostrada na Figura 5.57 se agrava nos ambientes em que existe uma maior ocupação e, conseqüentemente, maior geração interna de umidade e maior carga latente a ser removida na Serpentina de Resfriamento e Desumidificação (SRD).

A Figura 5.58 mostra a mesma análise da Figura 5.57 para o ambiente Convivência, no Sistema AC-PT/S2. Observa-se que neste caso, mesmo para o Cenário C0, a umidade fica alta ao longo de todo o período de funcionamento do equipamento, atingindo um mínimo de 58% às 16 horas. Da Figura 5.58-B, pode se notar que neste sistema, devido à maior ocupação nominal do ambiente Convivência, a fração mínima de ar externo definida pela vazão de renovação calculada conforme ABNT (2008b), corresponde a 70% da insuflação total do sistema. Por si só, esse fato já insere mais umidade externa aos sistemas e somado à maior geração interna, dificulta o controle de umidade neste ambiente.

Por este motivo, também, o EAE tem pouca influência na umidade relativa interna no Modelo M1, conforme mostram as curvas tracejadas azul, preta e verde que praticamente se sobrepõem na Figura 5.58-A. Porém, ainda se nota que o Cenário C1 causa os maiores níveis de umidade relativa interna.

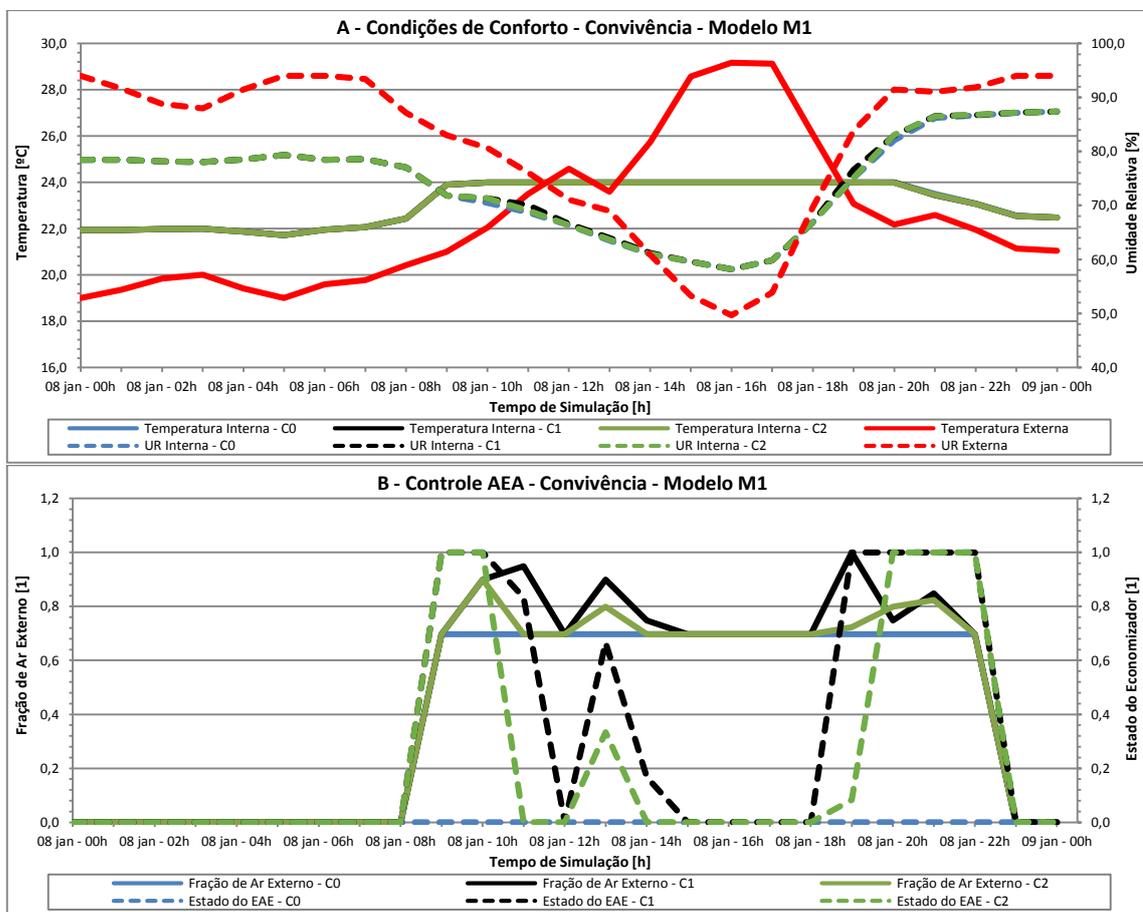


Figura 5.58: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Convivência, sistema AC-PT/S2 - Modelo M1, em 08 de janeiro.

Conforme se observou no início desta Seção, o dia 08 de Janeiro é particularmente favorável para a aplicação do EAE, apesar da alta umidade relativa externa no início do dia. Dessa forma, a situação mostrada na Figura 5.57 e na Figura 5.58 se agrava ainda mais nos dias em que o EAE permanece ativado por um maior período de tempo e a umidade relativa externa é ainda mais alta. Pois os dias com condições externas mais amenas, onde o controlador EAE utiliza vazão a de ar externo em 100% da insuflação do sistema, são exatamente aqueles em que a umidade relativa externa fica próxima dos 100%, frequentemente com chuvas, na região sudeste do Brasil.

A Figura 5.59 e a Figura 5.60, mostram respectivamente os Sistemas AC-P1/S2 e AC-PT/S2, no dia 02 de janeiro, onde as condições externas foram semelhantes às citadas. Observa-se que nos dois sistemas, o economizador permaneceu ativado durante todo o dia. Pode-se observar na Figura 5.59-B, que a despeito do economizador estar ativado, tanto para o Cenário C1 como para o Cenário C2, a fração de ar externo é menor que a unidade no início da manhã e no final da tarde. Nestes momentos, o controlador EAE modula a vazão de ar externo para controlar a temperatura sem uso da compressão mecânica de vapor.

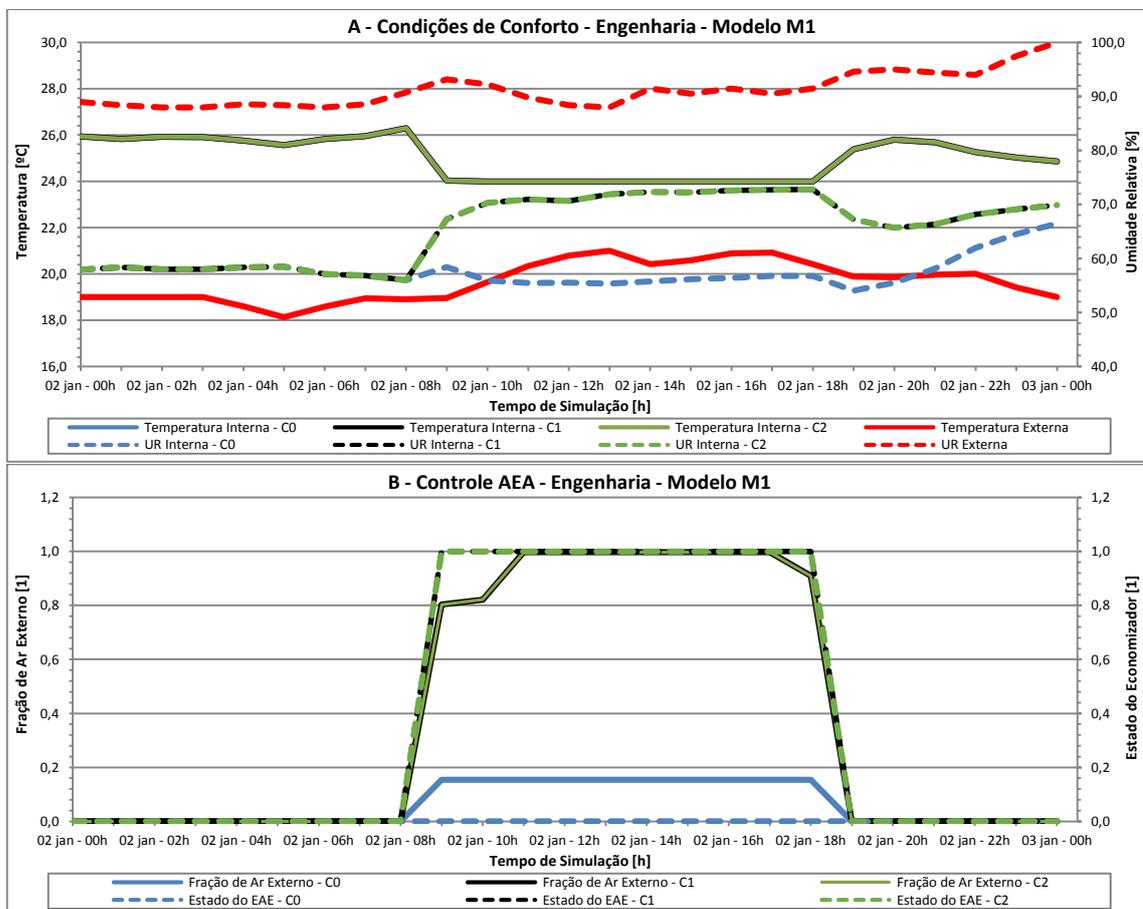


Figura 5.59: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Engenharia, sistema AC-P1/S2 - Modelo M1, em 02 de janeiro.

Observa-se da Figura 5.59-A, que a aplicação do EAE elevou consideravelmente a umidade no ambiente Engenharia. Observa-se também, desta figura, que a temperatura interna praticamente não sofreu alteração com o emprego do EAE. Outro dado interessante no comportamento da temperatura na Engenharia, refere-se ao fato desta estar acima de 24°C quando o sistema entra em funcionamento e, voltar a subir quanto o equipamento é desligado. Isso ocorre praticamente em todo o período primavera-verão, quando a temperatura interna na engenharia fica acima dos 24° C, mesmo nos momentos mais frescos do dia, e inclusive durante a noite. Fato similar foi observado para o Auditório na Seção 5.1.1, Figura 5.5.

Por outro lado, da Figura 5.60-A, nota-se que o EAE não causou interferência significativa na temperatura e, nem mesmo, na umidade relativa. E ao contrário do que ocorre na Engenharia e no Auditório, a temperatura interna na Convivência fica abaixo de 24°C quando os sistemas não estão em funcionamento. Isso causa, inclusive, o atraso de tempo decorrido até que a temperatura chegue aos 24° C, no início da manhã e no final da tarde.

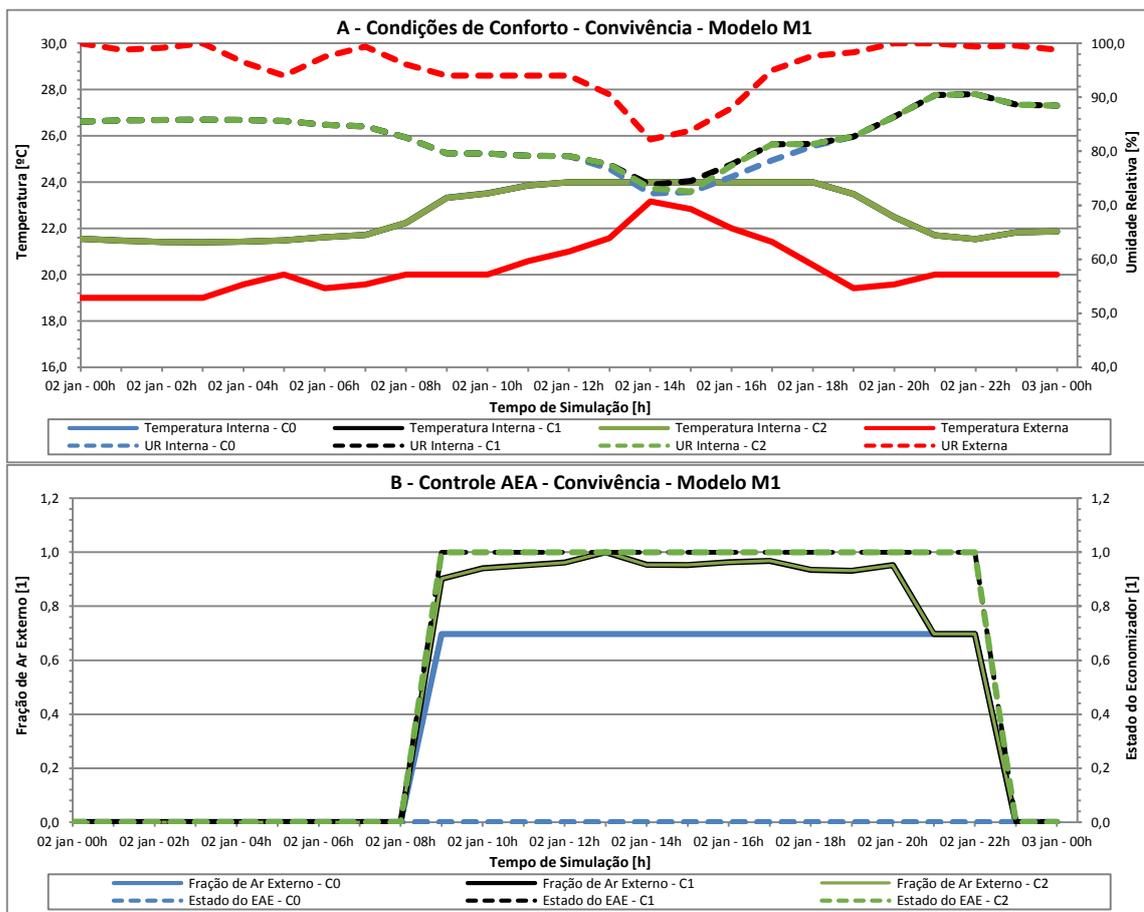


Figura 5.60: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Convivência, sistema AC-PT/S2 - Modelo M1, em 02 de janeiro.

No caso da Convivência, a temperatura fica abaixo de 24°C ao longo do dia, praticamente ao longo do ano todo, inclusive nos dias com manhãs quentes de verão. Esse fenômeno decorre da alta inércia térmica de grandes ambientes como a Convivência, conforme foi observado, também na Seção 5.1.1. Na prática, pode-se observar tal fato quando se adentra em grandes salões de festa, em momentos em que os mesmos estão desocupados, e nota-se que a temperatura interna é consideravelmente menor que a externa, mesmo em dias quentes e com os sistemas de condicionamento de ar desligados. Dessa forma, a carga sensível da Convivência é baixa com relação à carga latente, resultando em um baixo fator de calor sensível. Nestas condições, equipamentos convencionais de ar condicionado, com controle termostático de capacidade, tendem a satisfazer a carga térmica sensível antes que a carga latente seja atendida. Neste momento, o compressor é desligado e o equipamento permanece em modo ventilação. Portanto, a umidade relativa sobe e permanece acima de 70% mesmo sem a atuação do EAE.

Nessas condições, a alta umidade interna deve baixar o fator de calor sensível no equipamento até que a umidade volte aos níveis desejados. Porém, isso causaria a diminuição da temperatura interna, e o compressor desliga pelo termostato, antes que toda a umidade seja removida. Além disso, em condições de carga parcial como a mostrada na Figura 5.60, conforme Shirey e Henderson (2004), ocorre a degradação da capacidade latente do equipamento, principalmente em sistemas com insuflação contínua. Assim, com o ventilador do evaporador continuamente ativado, quando o compressor desliga em função do sinal do termostato, parte da umidade retirada do ar e que permaneceu nas aletas da SRD, volta a se evaporar e retorna ao ambiente.

Por todos esses fatores, o dimensionamento do equipamento por meio das condições de projeto onde ocorre o pico de carga sensível, não é suficiente para garantir que o sistema atenda toda a carga latente do ambiente, durante o ano todo. Em ambientes com carga latente crítica como a Convivência, é necessário algum controle mais efetivo da umidade relativa, o que aumenta os custos de implantação, operação e manutenção dos sistemas, devido ao maior número de componentes, como serpentinas de reaquecimento, umidostatos, etc., além do uso mais intenso do compressor.

Uma outra alternativa para o problema da alta umidade relativa, são os desumidificadores dessecativos, que através de um cilindro rotativo contendo material higroscópico, adsorve a umidade do fluxo de ar externo (chamado ar de processo). Apesar de utilizar processos exclusivamente passivos para a remoção da umidade, os cilindros dessecativos também possuem alto custo, que inviabilizam seu uso em sistemas deste tipo.

Como o objetivo inicial deste trabalho é avaliar as técnicas DCV e EAE aplicadas aos sistemas de condicionamento de ar comumente encontrados no Brasil, as análises de sistemas com controle de umidade serão incluídas apenas como sugestões para trabalhos futuros.

Para o Modelo M4, onde o controle de umidade foi melhor devido à atuação do DCV, o EAE também causou aumento na umidade relativa interna no dia 08 de janeiro. Da Figura 5.61-A, observa-se que nos momentos onde EAE é ativado, conforme a Figura 5.61-B, as curvas tracejadas preta e verde, que denotam respectivamente a umidade relativa nos Cenários C1 e C2, distanciam-se da curva tracejada azul do Cenário C0. Tal fato se repete tanto no início da manhã como no final do dia. No final do dia, para o Cenário C2, com uma atuação menos intensa do EAE, a curva de umidade relativa ficou próxima à do Cenário C0.

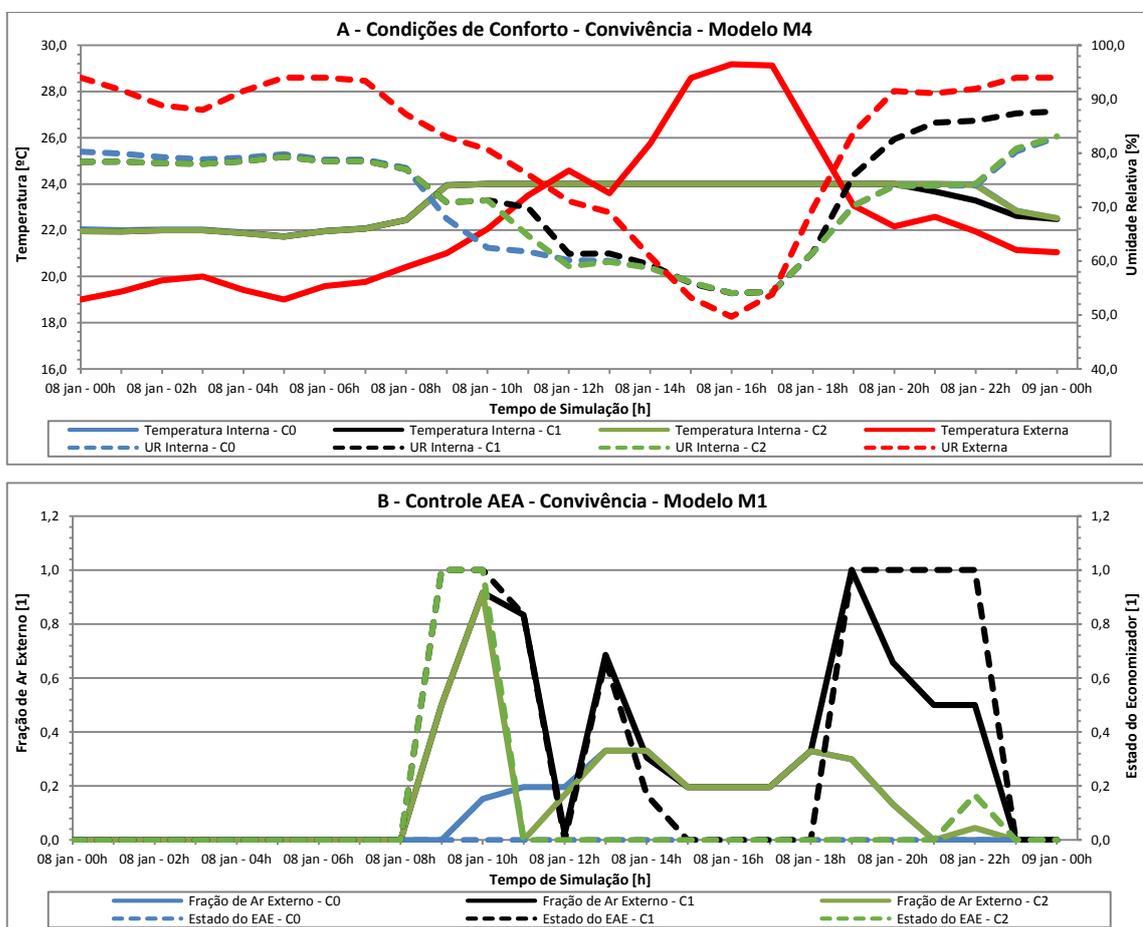


Figura 5.61: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Convivência, sistema AC-PT/S2 - Modelo M4, em 08 de janeiro.

Tal fato se repetiu no dia 02 de janeiro conforme mostra a Figura 5.62. Tanto no Cenário C1, como no Cenário C2, a umidade subiu consideravelmente e ficou alta durante o dia todo.

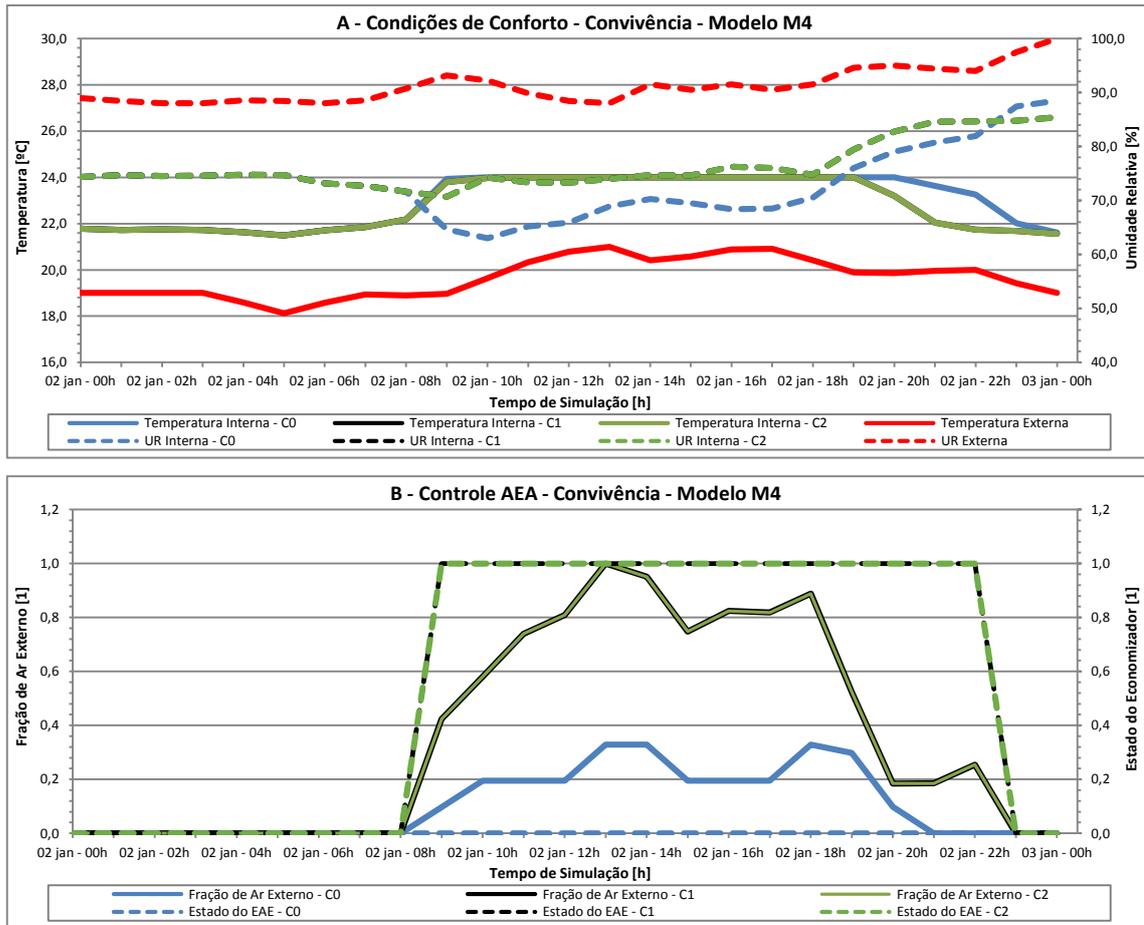


Figura 5.62: Impacto da ventilação de ar externo nas condições de conforto e atuação do controle EAE na Convivência, sistema AC-PT/S2 - Modelo M4, em 02 de janeiro.

De forma geral, não existe um consenso absoluto sobre os efeitos da alta umidade relativa em ambientes internos. A umidade relativa interna acima de 70% está diretamente relacionada à proliferação de fungos e bolores e podem causar problemas respiratórios, além de danificar os acabamentos internos, favorecer o apodrecimento de estruturas de madeira e causar oxidação em estruturas metálicas como vigas. Porém, como baixa umidade e redução no consumo de energia nunca estão associados, estão sendo feitos esforços no sentido de avaliar os reais efeitos adversos causados por alta umidade relativa e permitir o aumento de sua faixa aceitável em ambientes condicionados. Dessa forma, até mesmo por iniciativa da ASHRAE, vários trabalhos vêm sendo feitos de modo a quantificar os efeitos adversos da alta umidade relativa.

Por exemplo, Memarzadeh (2012) faz uma revisão bibliográfica sobre a relação da temperatura e da umidade relativa com a transmissão de vírus infecciosos. Apuraram que, é impossível determinar uma faixa única de temperatura e umidade que minimize os mecanismos de transmissão, pois a umidade relativa teria pouco ou nenhum efeito sobre a incidência de

doenças infecciosas em ambientes com altas taxas de ventilação, onde a transmissão de longo alcance não ocorre com frequência, ou seja, a taxa de ventilação está mais relacionada à incidência de infecções que a umidade relativa. Observa-se ainda que as elevadas taxas de ventilação de ar fresco encontrados em edifícios mais velhos e com vazamentos podem diluir a concentração de patógenos, alergênicos e substâncias químicas nocivas, e assim, compensar alguns dos problemas de saúde associados com a umidade relativa, o que não ocorre nos edifícios de alta eficiência energética, que são praticamente herméticos e utilizam baixas taxas de renovação de ar. Ou seja, não se pode afirmar que a umidade relativa alta é danosa a seres humanos.

Além disso, a proliferação de fungos e bolores em ambientes com alta umidade, aparentemente está mais relacionada a taxas insuficientes de ventilação, o que não ocorreria em sistemas dotados de controle EAE. No entanto, antes que os controles EAE possam ser usados maciçamente como alternativa de consumo de energia, deve ser provado que o aumento de umidade decorrente de seu uso, não causará problemas de saúde aos ocupantes.

Assim, o Economizador de Ar Externo (EAE), foi responsável pela maior parcela da redução de consumo obtida neste trabalho. Em conjunto com o DCV, o EAE permitiram aproveitar o potencial do ar externo de promover o resfriamento gratuito, nos momentos em que sua redução causava aumento no consumo. Dessa forma, com as reduções proporcionadas pelo EAE no início da manhã e final da tarde, onde as condições externas são mais amenas, e pelo DCV ao longo dos momentos mais quentes do dia, obteve-se uma otimização da curva de carga térmica, e uma redução da ordem de 12% no consumo anual do edifício, para o Modelo M4 dotado de DCV-IAQP configurado para a 1.100 ppm de CO₂.

Capítulo 6

6. Análise Econômica

Para a análise econômica dos impactos das técnicas DCV e EAE, devem ser considerados os custos envolvidos, referentes aos dampers motorizados, atuadores, sensores, controladores eletrônicos, etc. Em alguns casos, tais dispositivos integram pacotes opcionais oferecidos por alguns fabricantes de equipamentos. Em outros, podem ser adquiridos por meio de empresas especializadas em dispositivos de automação industrial. No âmbito de uma análise econômica, em ambos os casos, os equipamentos utilizados em sistemas de Ventilação Sob Demanda (DCV) e de Economizadores de Ar Externo (EAE), podem ser considerados pacotes complementares do condicionador de ar. Portanto, uma análise econômica sobre a implementação desses sistemas é válida tanto para novas instalações, como para readequação (*retrotif*) de sistemas existentes.

Este fato sugere que apenas o investimento adicional no sistema de controle DCV/EAE deve ser considerado na análise, juntamente como a economia de energia proporcionada pelas técnicas consideradas, com relação ao equipamento convencional, no caso o Modelo M1 no Cenário C0, Caso Base. Uma vez que o dispêndio financeiro com o equipamento de climatização em si ocorreria de qualquer forma, os custos com os acessórios opcionais seriam os mesmos, tanto para uma nova instalação como para a operação de retrofit.

Dessa forma, a análise econômica é efetuada considerando-se os ganhos relativos a economia anual de energia (custo evitado), proporcionada pelo cenário em questão, tomando como investimento inicial o custo do sistema DCV/EAE. Com base no fluxo de caixa, então, pode-se levantar os indicadores financeiros VPL, TIR e tempo de retorno do investimento (Payback Simples).

Ainda, com a disponibilidade e diversidade dos dados gerados pelas simulações em EnergyPlus, torna-se possível, inclusive, avaliar a viabilidade econômica da implantação do DCV/EAE em cada equipamento condicionador individualmente, e no edifício como um todo.

6.1 Cálculos Econômicos no EnergyPlus

Para se obter o consumo de energia em moeda corrente também é possível utilizar o EnergyPlus, através dos objetos específicos para cálculos econômicos, conforme EnergyPlus (2013b). Tais objetos englobam, por exemplo, cálculos do custo com energia elétrica em diversas modalidades tarifárias como, por exemplo, a horo-sazonal, por faixas de consumo, por demanda, etc., além dos cálculos de outros encargos da conta de energia elétrica como taxas, impostos e tributos.

Neste trabalho, as funcionalidades econômicas serão utilizadas para obter as contas de energia elétrica, considerando a estrutura tarifária da concessionária dos serviços de fornecimento de energia, os encargos com iluminação pública e a estrutura tributária brasileira. A grande vantagem do uso do EnergyPlus para esta tarefa é o cálculo do consumo (ou demanda) em modalidades tarifárias horo-sazonais, pois os dados do consumo são obtidos diretamente da simulação, no momento em que ocorrem, e são sinalizados como na ponta ou fora de ponta, para o cálculo preciso do custo da energia, de acordo com a tarifa praticada em determinado tempo de simulação.

Assim, para o cálculo do Consumo Faturado de Energia, serão usados os objetos das Classes *CurrencyType*, *UtilityCost:Tariff*, *UtilityCost:Charge:Simple*, *UtilityCost:Charge:Block* e *UtilityCost:Variable*. Em seguida, a função de cada uma dessas Classes é brevemente explicada.

Inicialmente, a Classe *CurrencyType* define a moeda na qual serão feitos os cálculos, bem como seu símbolo monetário. Para o Real (R\$), basta escolher a opção RBL em seu único campo. Dessa forma, o símbolo R\$ aparecerá nos relatórios. Em seguida, a Classe *UtilityCost:Tariff* define os parâmetros gerais de cada tipo de estrutura tarifária a ser modelada. Podem ser incluídos valores fixos mensais, como taxas de fornecimento de energia, encargos, custos com iluminação pública, etc. Os objetos desta Classe também podem ser usados para referenciar os agendamentos que definem os períodos, horários e características sazonais de validade de determinada tarifa.

Para a aplicação de determinada tarifa em si, a Classe *UtilityCost:Charge:Simple* é utilizado para, efetivamente, multiplicar um valor de tarifa por um determinado montante de consumo ou demanda. A partir dos agendamentos definidos na Classe *UtilityCost:Tariff*, o

EnergyPlus define, automaticamente, variáveis internas que receberão parcelas de energia ou demanda, utilizadas em cada momento da simulação (na ponta, fora de ponta, verão, período seco, etc.). Assim, com os objetos desta Classe, cada valor de tarifa é aplicado à correspondente parcela de energia utilizada, e podem ser somados de diversas formas ou integralizados em uma base mensal. A Classe *UtilityCost:Charge:Simple* ainda pode ser utilizada para aplicar diferentes tributos e impostos em cada parcela de consumo calculada.

Para tarifas mais complexas, a Classe *UtilityCost:Charge:Block* pode ser utilizada para “fatiar” ou fracionar o consumo ou demanda em blocos, onde à cada fatia (ou bloco) uma tarifa diferente será aplicada. Neste trabalho, por exemplo, a Classe *UtilityCost:Charge:Block* foi usada exclusivamente para os cálculos de tarifa sobre a demanda de potência, uma vez que no Brasil, o consumidor enquadrado nesta modalidade tarifária contrata um valor máximo de para o período. E a cada unidade de potência adicional demandada, as concessionárias cobram uma tarifa diferenciada, denominada Tarifa de Ultrapassagem. Assim, o primeiro bloco é definido como toda potência consumida até o valor de demanda contratada, ao qual é aplicada a tarifa de demanda. Sobre o segundo bloco, que contém toda a potência que, eventualmente, supere a franquia contratada, é aplicada a tarifa de ultrapassagem de demanda.

Finalmente, a Classe *UtilityCost:Variable* é, simplesmente, uma matriz coluna com doze linhas referentes aos meses do ano, nas quais o usuário define valores mensais a serem aplicados aos montantes calculados pelas Classes anteriores. Podem ser utilizados, para aplicar tarifas de energia ou demanda, que variam mês a mês. Neste trabalho, a Classe *UtilityCost:Variable* foi utilizada para aplicar os encargos PIS-PASEP, COFINS e ICMS pois, dois primeiros possuem alíquotas diferentes para cada mês, conforme AES Eletropaulo (2014).

Além disso, como os três encargos são calculados “por dentro”, ou seja, integram a própria base de cálculo, e como PIS e COFINS incidem sobre o ICMS, foram definidas uma variável para cada encargo, todas com valores mensais diferentes (apesar da alíquota do ICMS ser única, de 18% para o estado de São Paulo). Esses valores são percentuais equivalentes que, multiplicados pelo valor faturado, resultam no valor efetivamente pago, referente a cada imposto. Dessa forma, assegura-se que os valores corretos de cada encargo sejam mostrados nos relatórios de custos do EnergyPlus.

A Tabela 6.1 mostra exemplos de cada uma das Classes mencionadas anteriormente, onde se pode notar o novo sistema de tarifação nos dados de entrada de alguns objetos, conforme explicado em seguida.

Tabela 6.1: Exemplo dos objetos utilizados para cálculos de tarifas.

Cálculos Econômicos	
Campo de Entrada	Comentário do Arquivo IDF
Tipo de Unidade Monetária	
CurrencyType, BRL;	! –Classe ! –Unidade Monetária
Características da Tarifa	
UtilityCost:Tariff, TarifaAzul-Bandeiras-Consumo-Eletropaulo, Electricity:Facility, kWh, , , HorarioDePonta, BandeiraVerdeAmarelaVermelha;	! –Classe ! –Nome ! –Medidor de energia ! –Fator de conversão escolhido ! –Fator de conversão de energia ! –Fator de conversão de demanda ! –Agendamento horário de uso ! –Agendamento sazonal de uso
Consumo Faturado na Ponta	
UtilityCost:Charge:Simple, ConsumoFaturado-Ponta-BandeiraVerde, TarifaAzul-Bandeiras-Consumo-Eletropaulo, peakEnergy, BandeiraVerde, EnergyCharges, 0.24833;	! –Classe ! –Nome ! –Nome da tarifa ! –Variável de origem ! –Período sazonal ! –Nome da categoria de variável ! –Custo por unidade
Demanda Faturada na Ponta	
UtilityCost:Charge:Block, DemandaFaturada-Ponta, TarifaAzul-Bandeiras-Demanda-Eletropaulo, peakDemand, Annual, DemandCharges, UltrapassagemPonta, 1, 120, 9.15;	! –Classe ! –Nome ! –Nome da tarifa ! –Variável de origem ! –Período sazonal ! –Nome da categoria de variável ! –Variável destino do excedente ! –Multiplicador de tamanho do bloco ! –Tamanho do bloco 1 ! –Custo por unidade do bloco 1
Demanda Faturada na Ponta	
UtilityCost:Variable, PIS-PASEP_ICMS-18, TarifaAzul-Bandeiras-Consumo-Eletropaulo, Dimensionless, 0.0138, 0.0127, 0.0138, 0.0149, 0.0132, 0.0123, 0.0153, 0.0084, 0.0096, 0.0079, 0.0161, 0.016,	! –Classe ! –Nome ! –Nome da tarifa ! –Tipo de variável ! –Valor para janeiro ! –Valor para fevereiro ! –Valor para março ! –Valor para abril ! –Valor para maio ! –Valor para junho ! –Valor para julho ! –Valor para agosto ! –Valor para setembro ! –Valor para outubro ! –Valor para novembro ! –Valor para dezembro

6.2 O Sistema de Bandeiras Tarifárias

Como se pôde notar, na Tabela 6.1 são mostrados exemplos referentes à Tarifa Azul, porém com a classificação “Bandeiras” ao invés de “Horo-sazonal”. A partir de 2015, a forma de tarifação da energia elétrica no Brasil será diferente, conforme regulamentação da ANEEL. Na nova estrutura tarifária, permanece o sinal horário, que determinará tarifas diferenciadas de energia elétrica para os horários de ponta e fora de ponta, porém o sinal sazonal será eliminado, e não mais existirá a tarifação diferenciada para os períodos seco e úmido. Em seu lugar, passará a vigorar o sistema de Bandeiras Tarifárias, que sinalizará a tarifa a ser aplicada em determinado mês, para todos os consumidores do mercado cativo nacional.

A justificativa para a mudança são os custos associados à geração térmica, utilizada em complementação à geração hidroelétrica. No atual modelo tarifário, sempre que as centrais térmicas são acionadas, em virtude de escassez de chuvas e redução dos níveis dos reservatórios, há um aumento no custo da energia elétrica devido à maior participação das térmicas, mais caras com relação à hidráulica. E este custo adicional só poderá ser repassado para os consumidores no próximo ciclo de reajuste tarifário, que é feito anualmente. Com isso, as concessionárias têm que absorver o adicional de custo por até um ano.

No novo modelo, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) sinalizará aos consumidores e às concessionárias, por meio das Bandeiras, qual tarifa estará em vigor no próximo período, com base no atual custo com a geração de energia elétrica. Segundo ANEEL (2014a), isso será feito com uma tarifa base, imutável ao longo do ano todo; correspondente à Bandeira Verde. Sempre que os custos de geração estiverem abaixo de 200 R\$/MWh, esta bandeira estará em vigor e a tarifa base não sofrerá alteração.

Quando os custos de geração aumentarem em decorrência de uma maior participação das térmicas e estiverem na faixa de 200 a 350 R\$/MWh, será sinalizada a Bandeira Amarela e a tarifa base sofrerá acréscimo de 15 R\$/MWh de consumo.

Ainda, caso a participação das térmicas na matriz energética atinja nível crítico e os custos de geração superarem os 350 R\$/MWh, será sinalizada a Bandeira Vermelha e a tarifa de energia sofrerá acréscimo de 30 R\$/MWh.

A nova estrutura ajudará a equilibrar os custos das concessionárias, porém penalizará os consumidores, que estarão expostos a variações constantes de tarifa, dificultando o equilíbrio

dos custos, sobretudo na indústria. Dessa forma, o novo modelo já foi considerado neste trabalho, pois o sistema de bandeiras deveria ter entrado em vigor em janeiro de 2014, tendo sido adiado para 2015. A razão do adiamento, segundo a ANEEL, foi a necessidade de uma maior discussão sobre o novo modelo visto que não foi bem aceito por setores da sociedade. Extraoficialmente, outra razão para o adiamento seria evitar o aumento dos custos de energia elétrica em um ano que começou com altíssimo custo de geração, conforme mostrado em seguida, e evitar pressões sobre a inflação em ano de eleições presidenciais.

Assim, a grande crítica ao novo sistema de tarifação é que ele protege as concessionárias e penaliza os consumidores pelos problemas de gestão do Sistema Interligado Nacional (SIN), e perpetua os problemas do falho modelo mercantil imposto ao setor elétrico desde a privatização do Sistema Eletrobrás em 1995. Além disso, o Governo Federal continua utilizando uma política conservadora de eficiência energética, conforme dito na Seção 1.1.

6.3 Cálculos dos Custos de Energia

A partir dos valores de consumo (kWh) e de demanda de potência (kW), calculados nas simulações com os objetos apropriados definidos no arquivo de entrada, obtêm-se os custos decorrentes do uso de energia, levando-se em conta as tarifas binômias ou monômias, tal qual são calculadas na prática pelas concessionárias de energia elétrica. Foram consideradas 10 modalidades da tarifação neste trabalho, quais sejam:

- **Tarifa Azul Consumo:** valores diferenciados de tarifas de consumo para horário de ponta e fora de ponta, para cada bandeira, perfazendo seis postos tarifários.
- **Tarifa Azul Demanda:** valores diferenciados de tarifas de demanda para horário de ponta e fora de ponta, perfazendo dois postos tarifários.
- **Tarifa Verde Consumo:** valores diferenciados de tarifas de consumo para horário de ponta e fora de ponta, para cada bandeira, perfazendo seis postos tarifários.
- **Tarifa Verde Demanda:** valor único de tarifa de demanda para todos os horários, ao longo do ano todo, com um único posto tarifário.
- **Tarifa Convencional Consumo:** valores diferenciados de tarifas de consumo para cada bandeira, perfazendo três postos tarifários.

- **Tarifa Convencional Demanda:** valor único de tarifa de demanda para todos os horários, ao longo do ano todo, com um único posto tarifário.
- **Tarifa Horo-sazonal Azul Consumo:** sistema de tarifação atual, possui valores diferenciados de tarifas apenas para horário de ponta e fora de ponta, perfazendo dois postos tarifários, pois o sinal sazonal já havia caído em 2013.
- **Tarifa Convencional Consumo:** sistema de tarifação atual, possui valor único de tarifa de consumo para o ano todo, com um único posto tarifário.
- **Tarifa Residencial Branca Consumo:** valores diferenciados de tarifas de consumo para horário de ponta, intermediário e fora de ponta, para cada bandeira, perfazendo nove postos tarifários.
- **Tarifa Residencial Convencional Consumo:** valores diferenciados de tarifas de consumo para cada bandeira, perfazendo três postos tarifários.

Cada uma dessas tarifas foi modelada pelos objetos das Classes apresentadas na Seção 6.1, com as tarifas para o sistema de bandeiras conforme Resolução Homologatória nº 1.563, de 2 de Julho de 2013, (ANEEL, 2013) e, para a tarifa Horo-sazonal Azul, conforme AES Eletropaulo (2014). Quanto às bandeiras sinalizadas pelo ONS, a Tabela 6.2 e a Tabela 6.3 trazem uma simulação feita por ANEEL (2014), mostrando as bandeiras que estariam em vigor nos anos de 2013 e 2014, a partir dos custos de geração apurados nestes períodos, para cada subsistema que integra o SIN.

Tabela 6.2: Custos de Geração e Bandeira Tarifária virtualmente em vigor para o ano de 2013.

Data	Custo de Geração				Bandeira Tarifária			
	SE/CO	S	NE	N	SE/CO	S	NE	N
Jan/13	364,05	364,05	364,05	364,05	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha
Fev/13	327,86	327,86	327,86	327,86	Amarela	Amarela	Amarela	Amarela
Mar/13	326,56	326,56	326,56	326,56	Amarela	Amarela	Amarela	Amarela
Abr/13	318,34	318,34	318,34	318,34	Amarela	Amarela	Amarela	Amarela
Mai/13	300,67	300,67	300,67	300,67	Amarela	Amarela	Amarela	Amarela
Jun/13	333,82	333,82	333,82	333,82	Amarela	Amarela	Amarela	Amarela
Jul/13	137,03	137,03	137,03	137,03	Verde	Verde	Verde	Verde
Ago/13	156,20	156,20	156,20	156,20	Verde	Verde	Verde	Verde
Set/13	248,44	248,44	248,44	248,44	Amarela	Amarela	Amarela	Amarela
Out/13	261,50	261,50	261,50	261,50	Amarela	Verde	Amarela	Amarela
Nov/13	303,52	303,52	303,52	303,52	Amarela	Amarela	Amarela	Amarela
Dez/13	296,31	296,31	296,31	296,31	Amarela	Amarela	Amarela	Amarela

Fonte: ANEEL (2014)

Tabela 6.3: Custos de Geração e Bandeira Tarifária virtualmente em vigor para o ano de 2013.

Data	Custo de Geração				Bandeira Tarifária			
	SE/CO	S	NE	N	SE/CO	S	NE	N
Jan/14	246,33	246,33	246,33	246,33	Amarela	Amarela	Amarela	Amarela
Fev/14	1063,81	1063,81	1063,81	1063,81	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha
Mar/14	1365,94	1365,94	1365,94	1365,94	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha
Abr/14	922,82	922,82	922,82	922,82	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha
Mai/14	916,07	916,07	916,07	916,07	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha
Jun/14	600,51	600,51	600,51	600,51	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha
Jul/14	446,88	446,88	446,88	446,88	Vermelha	Amarela	Vermelha	Vermelha
Ago/14	607,00	606,70	607,00	607,00	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha
Set/14	724,69	724,69	724,69	724,69	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha
Out/14	667,28	661,93	667,28	667,28	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha
Nov/14								
Dez/14								

Fonte: ANEEL (2014)

Observa-se que em 2013 predominaram os custos de geração que sinalizariam a bandeira amarela, com poucos períodos de bandeira verde. Por outro lado, o ano de 2014 apresentou altos custos de geração, principalmente nos meses de fevereiro, março, abril e maio, com predominância quase absoluta da bandeira vermelha. Provavelmente, o ONS já previa essa condição e optou por adiar a entrada em vigor do sistema de Bandeiras Tarifárias.

Dessa forma, a Tabela 6.4 mostra o sumário das faturas de energia elétrica, calculadas pelo EnergyPlus, para cada tarifa considerada. Observa-se que o medidor de energia utilizado, chamado Electricity:Facility, é uma variável interna do programa que contém toda a energia ou demanda consumida pelo edifício, ao longo do ano completo de simulação.

É interessante notar da Tabela 6.4, as diferenças de custos associadas a cada tarifa, evidenciando o grande auxílio proporcionado pelo EnergyPlus em estudos para reenquadramento tarifário de empreendimentos. Outro ponto interessante, é o aumento no custo de energia causado pela adoção do sistema de Bandeiras Tarifária, evidenciado pela comparação da Tarifa Horária Azul no sistema de bandeiras (R\$ 74.709,23) com a Tarifa Horazonal Azul no sistema atual (R\$ 64.698,03), por exemplo, onde se observa um aumento de 15%. Deve-se observar ainda, que esse aumento se refere ao cenário mostrado na Tabela 6.2 para o ano de 2013, com predominância da Bandeira Amarela. Esse aumento seria ainda maior para um cenário mais parecido com o da Tabela 6.3, ano de 2014, onde até o mês de Julho ocorreu predominância da Bandeira Vermelha.

Tabela 6.4: Custo anual com energia elétrica para o Modelo M1 no Cenário C0.

Modelo M1 – Cenário C0 – Eletropaulo		
Tarifa	Grupo Tarifário	Custo (R\$)
Tarifa Azul – Bandeiras – Consumo	Subgrupo A4	74.709,23
Tarifa Azul – Bandeiras – Demanda	Subgrupo A4	25.426,94
Tarifa Verde – Bandeiras – Consumo	Subgrupo A4	80.880,54
Tarifa Verde – Bandeiras – Demanda	Subgrupo A4	9.757,67
Tarifa Convencional – Bandeiras – Consumo	Subgrupo A4	73.506,10
Tarifa Convencional – Bandeiras – Demanda	Subgrupo A4	17.469,67
Tarifa Horo-sazonal Azul – Consumo (tarifação antiga)	Subgrupo A4	64.698,03
Tarifa Convencional – Consumo (tarifação antiga)	Subgrupo A4	78.598,74
Tarifa Residencial Branca – Bandeiras - Consumo	Subgrupo B1	102.234,45
Tarifa Residencial Convencional – Bandeiras - Consumo	Subgrupo B1	100.386,11

Dessa forma, com o novo sistema tarifário, em estudos econômicos como o desenvolvido neste trabalho, sempre deverão ser consideradas as mudanças nos custos de energia, associadas à ativação mais intensa de uma ou outra Bandeira, em estudos e análises de sensibilidade.

Outro aspecto importante referente ao enquadramento de uma edificação, dentro das estruturas tarifárias disponíveis, refere-se à distribuição de suas cargas ao longo dos períodos em que as tarifas são diferenciadas. Por exemplo, se em determinado empreendimento a curva de carga (seja consumo ou demanda) possui pico nos períodos em que as tarifas são mais altas, por exemplo no horário de ponta, as estruturas com diferenciação horária não serão interessantes. Em alguns casos, pode ser mais interessante o enquadramento na estrutura Convencional, e pagar uma tarifa maior, porém constante ao longo do ano todo, se resultar em um menor custo anual.

Deve ser ressaltado ainda, que a aplicação das estruturas tarifárias mostradas na Tabela 6.4, depende do enquadramento tarifário ao qual o empreendimento está submetido, definido pela tensão de fornecimento de energia elétrica. No Brasil, segundo ANEEL (2005), o sistema de fornecimento é dividido em dois grandes grupos, sendo o Grupo A para fornecimento entre 2,3 kV e 230,0 kV ou mais; e o Grupo B, para fornecimento abaixo de 2,3 kV.

No Grupo A estão enquadrados os maiores consumidores de energia elétrica no Brasil, como indústrias, shopping centers, hipermercados e grandes condomínios comerciais. Este grupo ainda é dividido em Subgrupos determinados por faixas de tensão de fornecimento. Já no Grupo B, estão os consumidores residenciais e comerciais, atendidos em tensão de

fornecimento abaixo de 2,3 kV. Ainda estão enquadrados neste grupo os consumidores rurais, residenciais de baixa renda, sistemas de iluminação pública, etc.

Para tensão de fornecimento entre de 2,3 kV e 25,0 kV, o empreendimento estará enquadrado no Subgrupo A4 e poderá usufruir das vantagens das tarifas binômias, onde o faturamento da energia poderá ser feito por Consumo (kWh) ou Demanda de Potência (kW). Neste grupo estão as edificações comerciais como a considerada neste trabalho. Serão consideradas as estruturas tarifárias referentes ao grupo A4, para avaliar os impactos das técnicas estudadas neste trabalho, sobretudo o DCV, também sobre a demanda de potência.

Os custos mostrados na Tabela 6.4 foram obtidos do consumo anual total de energia para toda a edificação. No objeto da Classe *UtilityCost:Tariff* mostrada no Tabela 6.1, observa-se que foi utilizado o medidor de energia *Electricity:Facility* (variável interna que soma parcelas de consumo ou demanda referentes a diversas fontes distintas), que integraliza o consumo total do edifício.

Porém, no âmbito de uma análise econômica referente aos sistemas de condicionamento de ar, os impactos das medidas analisadas deverão ser avaliados no consumo de energia dos equipamentos, e não do edifício como um todo. Dessa forma, a Classe *UtilityCost:Tariff* permite que se utilize qualquer medidor de energia, nativo ou definido pelo usuário, como entrada para esse campo. Assim, o medidor mais adequado para este fim, e que foi utilizado para gerar os resultados das análises econômicas, é o *Electricity:HVAC*, que contém todo o consumo referente aos condicionadores de ar, incluindo compressores e ventiladores. Nas próximas seções são mostrados os valores das faturas de energia, com base no consumo e na demanda, para estes dois medidores.

6.3.1 Consumo de Energia

A partir dos medidores *Electricity:Facility* e *Electricity:HVAC*, Tabela 6.5 mostra os valores anuais de consumo de energia para o edifício e para os sistemas de condicionamento de ar. Quanto aos condicionadores de ar, os valores mostrados serão a base para o faturamento por consumo, da conta de energia.

Tabela 6.5: Consumo anual total obtido pelos medidores *Electricity:Facility* e *Electricity:HVAC*.

Consumo Anual Total (MWh)							
Caso	Medidor de Energia	M0	M1	M2	M3	M4	M5
C0	<i>Electricity:Facility</i>	290,6	291,7	291,8	292,0	292,4	291,8
C1	<i>Electricity:Facility</i>	290,6	284,5	283,7	285,4	282,8	283,7
C2	<i>Electricity:Facility</i>	290,6	284,7	284,0	285,9	283,1	284,0
C0	<i>Electricity:HVAC</i>	72,27	73,45	73,49	73,66	74,12	73,49
C1	<i>Electricity:HVAC</i>	72,27	66,20	65,44	67,13	64,49	65,45
C2	<i>Electricity:HVAC</i>	72,27	66,42	65,68	67,58	64,80	65,68

Assim, a Tabela 6.6 mostra os custos anuais faturados por consumo, para os sistemas de ar condicionado, nos Modelos e Cenários considerados.

Tabela 6.6: Custo anual faturado pelo consumo.

Custo Anual por Consumo (R\$)							
Caso	Tarifa	M0	M1	M2	M3	M4	M5
Subgrupo A4 – Sistema de Bandeiras Tarifárias							
C0	Azul	19.093,15	19.275,07	19.288,85	19.328,66	19.441,30	19.306,38
C1	Azul	19.093,15	16.709,37	16.464,50	17.096,63	16.217,37	16.443,26
C2	Azul	19.093,15	16.834,99	16.604,65	17.261,37	16.387,92	16.589,12
C0	Verde	20.240,12	20.478,93	20.507,36	20.533,90	20.669,95	20.525,86
C1	Verde	20.240,12	17.754,71	17.493,30	18.157,53	17.236,51	17.471,38
C2	Verde	20.240,12	17.917,30	17.678,02	18.354,62	17.458,56	17.663,05
C0	Convencional	18.973,22	19.134,99	19.142,72	19.189,15	19.294,03	19.160,20
C1	Convencional	18.973,22	16.586,56	16.344,11	16.974,71	16.096,31	16.322,75
C2	Convencional	18.973,22	16.698,38	16.467,40	17.128,47	16.247,53	16.451,30
Subgrupo A4 – Sistema de Tarifação Atual							
C0	Azul	16.394,10	16.609,02	16.628,19	16.658,86	16.769,16	16.643,93
C1	Azul	16.394,10	14.372,51	14.164,94	14.700,74	13.955,73	14.146,96
C2	Azul	16.394,10	14.482,60	14.287,59	14.842,87	14.104,29	14.274,50
C0	Convencional	16.655,54	16.856,82	16.870,86	16.908,31	17.013,98	16.886,91
C1	Convencional	16.655,54	14.585,48	14.375,43	14.921,97	14.160,85	14.356,93
C2	Convencional	16.655,54	14.685,38	14.485,36	15.057,23	14.295,02	14.471,45
Subgrupo B1 – Sistema de Bandeiras Tarifárias							
C0	Branca	25.546,38	25.807,38	25.834,46	25.880,09	26.045,57	25.858,49
C1	Branca	25.546,38	22.388,17	22.056,35	22.896,06	21.728,21	22.028,19
C2	Branca	25.546,38	22.558,54	22.250,98	23.118,99	21.966,16	22.230,59
C0	Convencional	25.699,52	26.010,09	26.031,77	26.089,54	26.252,59	26.056,52
C1	Convencional	25.699,52	22.505,42	22.181,31	23.024,62	21.850,21	22.152,76
C2	Convencional	25.699,52	22.659,57	22.350,92	23.233,32	22.057,23	22.329,46

Para melhor ilustrar as reduções de consumo permitidas pelas técnicas DCV e EAE, a Tabela 6.7 mostra as reduções percentuais de consumo obtidas em cada tarifa

Tabela 6.7: Redução percentual dos custos de energia faturados com base no consumo.

		Economia (%)					
Caso	Tarifa	M0	M1	M2	M3	M4	M5
Subgrupo A4 – Sistema de Bandeiras Tarifárias							
C0	Azul	-0,94	0,00	0,07	0,28	0,86	0,16
C1	Azul	-0,94	-13,31	-14,58	-11,30	-15,86	-14,69
C2	Azul	-0,94	-12,66	-13,85	-10,45	-14,98	-13,93
C0	Verde	-1,17	0,00	0,14	0,27	0,93	0,23
C1	Verde	-1,17	-13,30	-14,58	-11,34	-15,83	-14,69
C2	Verde	-1,17	-12,51	-13,68	-10,37	-14,75	-13,75
C0	Convencional	-0,85	0,00	0,04	0,28	0,83	0,13
C1	Convencional	-0,85	-13,32	-14,59	-11,29	-15,88	-14,70
C2	Convencional	-0,85	-12,73	-13,94	-10,49	-15,09	-14,03
Subgrupo A4 – Sistema de Tarifação Atual							
C0	Azul	-1,29	0,00	0,12	0,30	0,96	0,21
C1	Azul	-1,29	-13,47	-14,72	-11,49	-15,97	-14,82
C2	Azul	-1,29	-12,80	-13,98	-10,63	-15,08	-14,06
C0	Convencional	-1,19	0,00	0,08	0,31	0,93	0,18
C1	Convencional	-1,19	-13,47	-14,72	-11,48	-15,99	-14,83
C2	Convencional	-1,19	-12,88	-14,07	-10,68	-15,20	-14,15
Subgrupo B1 – Sistema de Bandeiras Tarifárias							
C0	Branca	-1,01	0,00	0,10	0,28	0,92	0,20
C1	Branca	-1,01	-13,25	-14,53	-11,28	-15,81	-14,64
C2	Branca	-1,01	-12,59	-13,78	-10,42	-14,88	-13,86
C0	Convencional	-1,19	0,00	0,08	0,31	0,93	0,18
C1	Convencional	-1,19	-13,47	-14,72	-11,48	-15,99	-14,83
C2	Convencional	-1,19	-12,88	-14,07	-10,68	-15,20	-14,15

6.3.2 Demanda de Potência

Quanto à demanda de potência obtida dos medidores *Electricity:Facility* e *Electricity:HVAC*, a Tabela 6.8 mostra os valores anuais máximos para o edifício e para os sistemas de condicionamento de ar. Deve-se ressaltar que a demanda máxima varia mês a mês e poderão existir maiores reduções que as mostradas nesta Tabela, em determinado mês.

Tabela 6.8: Demanda anual obtida pelos medidores *Electricity:Facility* e *Electricity:HVAC*.

Demanda Anual Máxima (kW)							
Caso	Medidor de Energia	M0	M1	M2	M3	M4	M5
C0	<i>Electricity:Facility</i>	131,27	115,40	113,62	114,56	112,45	113,52
C1	<i>Electricity:Facility</i>	131,27	115,40	113,87	122,19	112,52	113,61
C2	<i>Electricity:Facility</i>	131,27	115,40	113,87	122,19	112,52	113,62
C0	<i>Electricity:HVAC</i>	73,48	57,67	56,01	56,90	54,74	55,96
C1	<i>Electricity:HVAC</i>	73,48	57,67	56,27	56,15	54,71	56,11
C2	<i>Electricity:HVAC</i>	73,48	57,67	56,27	56,15	54,72	56,12

Com base nos resultados do medidor *Electricity:HVAC*, então, a Tabela 6.9 mostra os valores faturados com base na demanda de potência.

Tabela 6.9: Custo anual faturado pela Demanda.

Custo Anual por Demanda (R\$)							
Caso	Tarifa	M0	M1	M2	M3	M4	M5
Subgrupo A4 – Sistema de Bandeiras Tarifárias							
C0	Tarifa Azul	14.527,57	11.221,52	11.000,70	11.178,67	10.802,14	10.992,68
C1	Tarifa Azul	14.527,57	11.191,11	11.002,35	12.109,72	10.801,66	10.983,43
C2	Tarifa Azul	14.527,57	11.234,71	11.049,39	12.141,45	10.826,51	11.030,10
C0	Tarifa Verde	6.051,46	4.542,00	4.452,42	4.508,69	4.374,32	4.448,37
C1	Tarifa Verde	6.051,46	4.540,39	4.466,45	5.044,70	4.371,04	4.455,73
C2	Tarifa Verde	6.051,46	4.586,17	4.516,28	5.044,62	4.424,22	4.507,22
C0	Convencional	10.834,26	8.131,78	7.971,40	8.072,15	7.831,58	7.964,15
C1	Convencional	10.834,26	8.128,90	7.996,52	9.031,79	7.825,70	7.977,32
C2	Convencional	10.834,26	8.210,86	8.085,74	9.031,65	7.920,92	8.069,52

Mais uma vez, observa-se o efeito do DCV quando considerado isoladamente (Cenário C0), que apesar de aumentar o consumo com relação ao Modelo M1, reduz a demanda. Neste caso a redução foi pequena, mas deve-se ressaltar que em edifícios maiores e com uso mais intenso do condicionamento de ar, a aplicação do DCV pode ser interessante até mesmo para rever o contrato com a concessionária de energia, e reduzir a franquia de demanda contratada. Por outro lado, o EAE possui pouco ou nenhum efeito na demanda.

Na Tabela 6.10 são mostradas as reduções percentuais nos custos faturados com base na demanda de potência, permitida pelas técnicas DCV e EAE.

Tabela 6.10: Redução percentual dos custos de energia faturados com base na demanda.

Caso	Tarifa	Economia (%)					
		M0	M1	M2	M3	M4	M5
Subgrupo A4 – Sistema de Bandeiras Tarifárias							
C0	Tarifa Azul	29,46	0,00	-1,97	-0,38	-3,74	-2,04
C1	Tarifa Azul	29,46	-0,27	-1,95	7,92	-3,74	-2,12
C2	Tarifa Azul	29,46	0,12	-1,53	8,20	-3,52	-1,71
C0	Tarifa Verde	33,23	0,00	-1,97	-0,73	-3,69	-2,06
C1	Tarifa Verde	33,23	-0,04	-1,66	11,07	-3,76	-1,90
C2	Tarifa Verde	33,23	0,97	-0,57	11,07	-2,59	-0,77
C0	Convencional	33,23	0,00	-1,97	-0,73	-3,69	-2,06
C1	Convencional	33,23	-0,04	-1,66	11,07	-3,76	-1,90
C2	Convencional	33,23	0,97	-0,57	11,07	-2,59	-0,77

Apesar dos custos obtidos nas modalidades de tarifação por demanda serem consideravelmente menores, sua consideração em uma análise financeiras exige maiores aprofundamentos nos estudos, e análises das distribuições horárias das cargas, para um diagnóstico mais completo. Tal aprofundamento, no entanto, foge do escopo deste trabalho e as análises serão limitadas às estruturas tarifárias por consumo.

Da Tabela 6.7 e da Tabela 6.10, portanto, pode-se observar os potenciais de redução proporcionados pelas técnicas DCV e EAE em termos de unidades monetárias, através das simulações e cálculos econômicos do EnergyPlus. Constata-se da Tabela 6.7 e da Tabela 6.10 que as maiores reduções de custo foram obtidas nas estruturas que não consideram alterações horárias nas tarifas, como as Convencionais. Tal fato indica, provavelmente, que parcelas consideráveis do consumo ocorreram no horário de ponta, onde as tarifas mais altas são consideradas, anulando o benefício das tarifas menores nos horários fora de ponta.

Como observado anteriormente para a demanda, um aprofundamento no estudo das distribuições do consumo ao longo do dia pode ser feito e, identificadas possibilidades de deslocamento destes consumos para os horários fora de ponta, promover a otimização da curva de carga da edificação. Com isso, pode-se inclusive elaborar um relatório profundo com avaliações dos benefícios do reenquadramento tarifário para a edificação em questão. Tal tarefa, no entanto, ficará como sugestão para trabalhos futuros.

Dentre as tarifas consideradas, e onde foram obtidos os maiores potenciais de economia, seleciona-se duas praticadas no Subgrupo A4 e duas praticadas no Subgrupo B1, todas elas considerando o novo sistema de Bandeiras Tarifária, para os cálculos dos indicadores econômicos feitos a seguir. São elas:

- Tarifa Horo-sazonal Azul – Estrutura atual
- Tarifa Convencional – Estrutura atual
- Tarifa Azul – Bandeiras Tarifárias
- Tarifa Convencional – Bandeiras Tarifárias

Os cálculos dos indicadores financeiros e a análise de sensibilidade são feitos nas próximas seções.

6.4 Viabilidade Econômica de Projetos

A viabilidade econômica de um projeto é determinada pelos indicadores Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Tempo de Retorno do Investimento (Payback Simples). Estes indicadores são obtidos a partir da série temporal de pagamentos, o Fluxo de Caixa, previsto para esse projeto, conforme mostra a Figura 6.1.

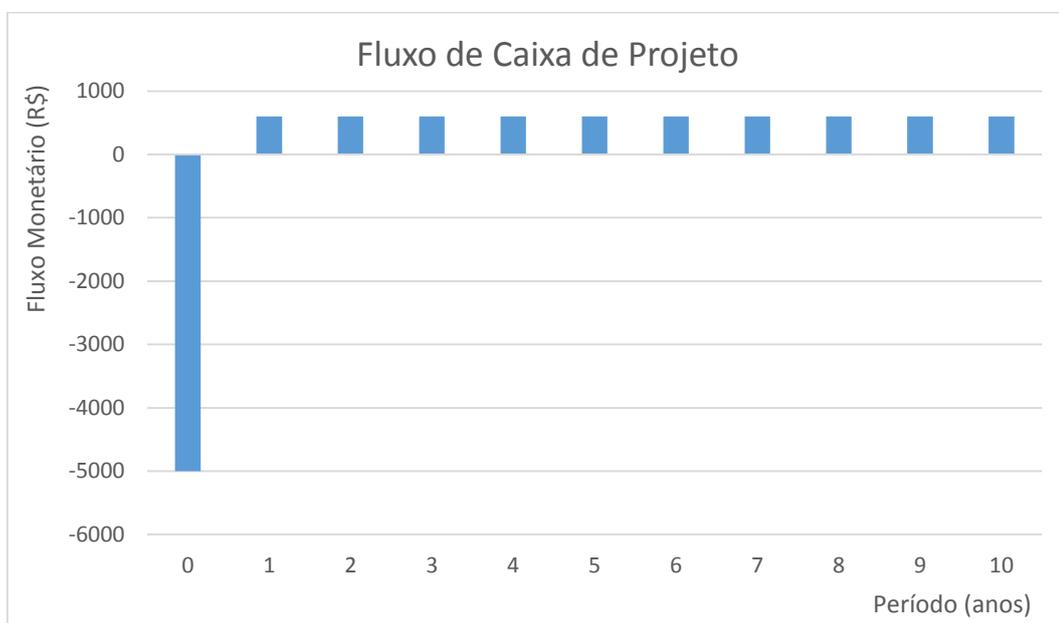


Figura 6.1: Exemplo de fluxo de caixa para uma alternativa de investimento.

De forma similar ao mostrado na Figura 6.1, no caso analisado aqui neste trabalho, tem-se um investimento inicial, referente aos custos dos equipamentos instalados para executar as funcionalidades DCV e EAE, feito na data zero do fluxo de caixa, como um valor negativo. Conseqüentemente, a instalação dos equipamentos irá gerar uma redução nos custos com

energia elétrica, o chamado Custo Evitado, que formará a série uniforme de pagamentos do Fluxo de Caixa. Como mencionado no início deste capítulo, os custos dos equipamentos de condicionamento de ar em si, que são os mesmos para todas opções analisadas, não irá aparecer no Fluxo de Caixa do projeto, tampouco irá influenciar na Análise Econômica.

Ao Fluxo de Caixa definido a partir das reduções de consumo obtidas das simulações, então, aplica-se os consagrados indicadores econômicos mencionados anteriormente. Como tais indicadores levam em conta a variação do valor do dinheiro no tempo, deve-se definir uma taxa de juros que remunere o investimento ao longo do ciclo de vida do projeto. No âmbito da análise de viabilidade de investimentos, a taxa de juros utilizada é denominada Taxa Mínima de Atratividade (TMA), definida como a taxa mínima de juros a partir da qual o investimento feito no projeto passa a ser remunerado e o investidor considera que está obtendo retorno financeiro. É também considerada o custo do capital investido na proposta.

6.4.1 Método do Valor Presente Líquido

O método do Valor Presente Líquido (VPL) consiste na transferência, para a data zero, de todos os pagamentos e recebimentos estimados para o Fluxo de caixa do projeto, descontado à Taxa Mínima de Atratividade. Dessa forma, pode-se comparar o retorno gerado pelo projeto ao longo de toda sua vida, com o investimento inicial aplicado no projeto. Portanto, se a soma na data zero, de todos os recebimentos for maior que o investimento inicial e o VPL for positivo, a proposta de investimento é atrativa. E quanto maior o Valor Presente Líquido, mais interessante é a proposta. O VPL é obtido pela Equação 6.1:

$$VPL = -I + C_e \left[\frac{(1+TMA)^n - 1}{(1+TMA)^{n \cdot i}} \right] \quad (6.1)$$

Onde: VPL : Valor Presente Líquido [R\$];

I : Investimento Inicial [R\$];

C_e : Custo evitado anual [R\$];

TMA : Taxa Mínima de Atratividade [%];

n : Vida do Projeto [anos].

6.4.2 Método da Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR), é a taxa de juros para a qual o valor presente das receitas é igual ao valor presente dos pagamentos. Ou seja, a TIR faz com que todos os recebimentos previstos para o projeto sejam iguais ao investimento inicial, na data zero. Consequentemente, a TIR é a taxa de juros que torna nulo o Valor Presente Líquido. Dessa forma, se a TIR é maior que a Taxa Mínima de Atratividade, o investimento no projeto é considerado atrativo e a alternativa deve ser aceita. A TIR é calculada igualando-se VPL a zero na Equação 6.1, usando-se métodos iterativos para o cálculo.

$$0 = -I + C_e \left[\frac{(1+TMA)^n - 1}{(1+TMA)^{n \cdot i}} \right] \quad (6.2)$$

6.4.3 Método do Tempo de Recuperação do Investimento

O método do Tempo de Recuperação do Investimento, ou tempo de retorno do investimento, conhecido mais comumente por Payback Simples, consiste na quantidade de períodos na qual o valor do investimento é integralmente recuperado. Ou seja, é obtido dividindo-se o valor do investimento pela economia gerada pelo projeto em um período, conforme mostra a Equação 5.1.

$$Payback_s = \frac{I}{C_e} \quad (6.3)$$

Onde: $Payback_s$: Tempo de retorno do investimento [anos];

I : Investimento Inicial [R\$];

C_e :Custo evitado anual [R\$/ano].

Deve ser ressaltado, no entanto, que apesar de bastante utilizado na prática, o método do Payback Simples possui uma considerável limitação conceitual, pois não considera a variação do valor do dinheiro no tempo. Por isso, é recomendável que este método seja utilizado somente como critério de desempate, não devendo ser utilizado sozinho como parâmetro para tomada de decisão.

6.5 Custos dos Controladores DCV e EAE

Para se obter uma análise econômica realista, é de suma importância o correto levantamento dos custos de implantação do sistema sendo analisado, de modo a se obter elementos para uma correta tomada de decisão. Dessa forma, a Tabela 6.11 apresenta os custos apurados para os equipamentos necessários ao funcionamento de sistemas DCV/EAE, a serem utilizados no projeto de implantação. Observa-se que os equipamentos mais caros são os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), responsáveis por executar as ações estabelecida a partir das leituras dos sensores, porém uma única unidade é capaz de operar diversos equipamentos.

Tabela 6.11: Custos dos equipamentos e controladores para DCV e EAE.

Fabricante	Equipamento	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
ACI	Sensor de temperatura ambiente	9	30,84	277,56
ACI	Sensor de temperatura externo	1	169,84	169,84
ACI	Sensor de temperatura duto	9	176,00	1.584,00
ACI	Transmissor de umidade duto	9	493,59	4.442,29
ACI	Transmissor de umidade externo	1	608,95	608,95
ACI	Sensor de CO ₂ ambiente	9	361,26	3.251,34
Belimo	Atuador proporcional 10 Nm	18	196,45	3.536,10
Alerton	IHM touch screen 7"	1	798,34	798,34
Alerton	Gerenciador de rede BACNET	1	6.136,96	6.136,96
Total				20.805,38

Fonte: Encon (2014)

Para o DCV ou o EAE operando isoladamente, nem todos estes componentes são necessários. Assim, a partir dos dados da Tabela 6.11, os custos totais e incrementais para cada caso estudados neste trabalho, são dados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12: Custos totais e incrementais para cada caso.

Controle	Custo total [R\$]	Custo incremental [R\$/TR]
DCV	13.722,74	258,43
EAE	17.554,04	330,58
DCV + EAE	20.805,38	391,81

6.6 Análise de Viabilidade

A partir das faturas de energia elétrica apresentadas na Seção 6.3, dos métodos de avaliação econômica para tomada de decisão apresentados na Seção 6.4 e dos custos dos equipamentos apresentados na Seção 6.5, pode-se avaliar a viabilidade econômica das opções estudadas neste trabalho. Da Tabela 6.7, observa-se que as reduções de consumo permitidas pelo Cenário C1 sempre são maiores que as reduções dos demais Cenários. No entanto, conforme foi mostrado no Capítulo 5, o controle diferencial da temperatura de bulbo úmido tem maior deficiência no controle da umidade relativa interna. Dessa forma, apesar de apresentar uma menor capacidade de retorno financeiro, os resultados do Cenário C2 é que serão considerados nas próximas análises. Também, como o Modelo M0 apresenta aumento de consumo no Cenário C2, os resultados para VPL, TIR e Payback não possuem sentido prático algum e foi omitido dos resultados.

Assim, adotando-se o tempo de vida do projeto como de 20 anos e uma taxa de juros de 10% para a TMA, pode-se levantar os indicadores financeiros conforme Seção 6.4. Para cada Modelo são considerados os custos de acordo com as combinações do DCV e do EAE mostradas na Tabela 6.12. A Tabela 6.13, portanto, mostra os indicadores calculados para o Cenário C2, no atual sistema tarifário.

Tabela 6.13: Indicadores financeiros para o Cenário C2 na atual estrutura tarifária.

Cenário C2					
Modelo	Modelo M1	Modelo M2	Modelo M3	Modelo M4	Modelo M5
Consumo Anual [kWh]	76.244,30	76.313,77	76.480,18	76.970,13	76.386,94
Investimento Adicional [R\$]	17.554,04	20.805,38	20.805,38	20.805,38	20.805,38
Tarifa Horo-sazonal Azul					
Custo Anual [R\$]	14.482,60	14.287,59	14.842,87	14.104,29	14.274,50
Custo Evitado [R\$]	2.126,42	2.321,43	1.766,15	2.504,73	2.334,52
VPL [R\$]	499,43	-947,03	-5.244,68	471,64	-845,72
TIR [%]	10,46%	9,26%	5,67%	10,36%	9,34%
Pay Back [anos]	8,26	8,96	11,78	8,31	8,91
Tarifa Convencional					
Custo Anual [R\$]	14.685,38	14.485,36	15.057,23	14.295,02	14.471,45
Custo Evitado [R\$]	2.171,44	2.371,46	1.799,59	2.561,80	2.385,37
VPL [R\$]	847,87	-559,82	-4.985,87	913,33	-452,16
TIR [%]	10,77%	9,56%	5,90%	10,70%	9,65%
Pay Back [anos]	8,08	8,77	11,56	8,12	8,72

Pode-se observar da Tabela 6.13, que apesar do Modelo M1 apresentar menor redução no consumo de energia, ele apresenta indicadores similares ao Modelo M4, devido aos menores custos de implantação do sistema. Do ponto de vista econômico, então, a aplicação isolada do EAE é interessante. Porém, deve-se lembrar que o Modelo M1, em geral, apresentou aumento na umidade relativa interna quando operando apenas com EAE.

Quanto à hipótese dos equipamentos operarem apenas com DCV (Cenário C0), conforme se viu no Capítulo 5, todos os Modelos apresentaram aumento no consumo e os indicadores não se aplicam. No entanto, deve-se considerar que o DCV, individualmente, melhora as condições de conforto pois apresenta um controle mais preciso tanto da temperatura como da umidade relativa.

Dessa forma, a decisão de investir em um sistema DCV deve levar em conta fatores intangíveis como o conforto e bem estar dos colaboradores. Provavelmente, o maior custo operacional de um sistema com DCV, irá melhorar a produtividade dos trabalhadores, porém esta análise leva em conta variáveis difíceis de se estimar.

Ainda da Tabela 6.13, pode-se observar que os Modelos M1 e M4, apesar de apresentarem viabilidade, possuem indicadores ruins. Em ambos os casos o VPL é baixo e a TIR é apenas 0,7% acima da TMA. Ou seja, dificilmente se optaria por investir em um sistema como esse sem um estudo mais profundo ou sem considerar os fatores intangíveis mencionados anteriormente.

A fim de antecipar as análises econômica que possivelmente venham ser feitas no cenário da nova estrutura tarifária brasileira, a Tabela 6.14 apresenta uma projeção dos indicadores mostrados na Tabela 6.13, caso o sistema de Bandeiras Tarifárias já estivesse em vigor.

Da Tabela 6.6 se observou que o atual sistema de tarifação da energia elétrica permitiu maiores reduções percentuais no custo anual com energia elétrica, em comparação com o novo sistema de Bandeiras Tarifárias, tanto para a tarifa Azul como para a Convencional. No entanto, a Tabela 6.14 mostra que os indicadores melhoraram consideravelmente, apesar de ainda não serem bons. A TIR aumentou quase dois pontos percentuais e o tempo de recuperação do capital diminuiu. Além disso, os Modelos M2 e M5 passaram a apresentar viabilidade econômica. Em todos os casos o VPL aumentou devido ao maior custo e, conseqüentemente, maior economia de energia.

Tabela 6.14: Indicadores financeiros para o Cenário C2 na nova estrutura tarifária.

Cenário C2					
Modelo	Modelo M1	Modelo M2	Modelo M3	Modelo M4	Modelo M5
Consumo Anual [kWh]	76.244,30	76.313,77	76.480,18	76.970,13	76.386,94
Investimento Adicional [R\$]	17.554,04	20.805,38	20.805,38	20.805,38	20.805,38
Tarifa Azul Bandeiras					
Custo Anual [R\$]	16.834,99	16.604,65	17.261,37	16.387,92	16.589,12
Custo Evitado [R\$]	2.440,08	2.670,42	2.013,70	2.887,15	2.685,95
VPL [R\$]	2.927,03	1.754,01	-3.328,74	3.431,41	1.874,21
TIR [%]	12,61%	11,34%	7,32%	12,58%	11,43%
Pay Back [anos]	7,19	7,79	10,33	7,21	7,75
Tarifa Convencional Bandeiras					
Custo Anual [R\$]	16.698,38	16.467,40	17.128,47	16.247,53	16.451,30
Custo Evitado [R\$]	2.436,61	2.667,59	2.006,52	2.887,46	2.683,69
VPL [R\$]	2.900,18	1.732,11	-3.384,31	3.433,81	1.856,71
TIR [%]	12,58%	11,32%	7,28%	12,58%	11,41%
Pay Back [anos]	7,20	7,80	10,37	7,21	7,75

6.7 Análise de Sensibilidade

Conforme mostraram os resultados da Seção 6.6, os indicadores VPL, TIR e Payback melhoraram consideravelmente com a migração para a nova estrutura tarifária. Tal fato evidencia a sensibilidade dos parâmetros analisados com relação ao custo do insumo energia elétrica. Assim, de modo a obter uma análise mais profunda dos parâmetros de mercado aos quais uma alternativa de investimento está sujeita, faz-se necessário uma análise de sensibilidade mais efetiva.

Dessa forma, deve-se analisar a influência de cada um dos parâmetros de entrada para a análise econômica nos indicadores VPL, TIR e Payback. Tais parâmetros são: o custo de energia conforme se viu anteriormente, o custo dos equipamentos mostrados na Tabela 6.11 e a taxa de juros. Dessa forma, pode-se simular situações que eventualmente ocorrem na economia do país e avaliar seu impacto futuro na decisão de investir ou não no projeto.

Pelas análises anteriores ficou claro que a melhor alternativa dentre todas é o Modelo M4, dentro do Cenário C2, que apresentou os melhores indicadores econômicos. Dessa forma,

serão repetidos os cálculos desses indicadores para um intervalo de $\pm 25,0\%$ para a variação dos parâmetros de entrada. Para cada ponto deste intervalo, serão calculados novos indicadores VPL, TIR e Payback, mostrando sua sensibilidade aos parâmetros de entrada. Para a tarifa Horo-sazonal Azul, os indicadores não foram bons e a TIR ficou muito próxima à TMA, por este motivo, a análise de sensibilidade será feita apenas para esta estrutura tarifaria, pois está no limite de viabilidade.

A Tabela 6.15 mostra os resultados da análise de sensibilidade, de onde se pode notar que com relação ao aumento da tarifa de energia elétrica, há uma dependência direta do VPL e da TIR e uma dependência inversa do Payback. Ou seja, com o aumento do custo evitado decorrente de um aumento na tarifa de energia, o projeto torna-se mais atrativo. Com relação ao Custo de Equipamento, ocorre o contrário. Com o aumento do Custo de Equipamento, VPL e TIR caem enquanto o Payback aumenta, tornando o projeto cada vez menos atrativo. Quanto à TMA, o VPL cai com o aumento dessa taxa, enquanto TIR e Payback permanecem constante. Para melhor visualizar a análise de sensibilidade, a Figura 6.2, a Figura 6.3 e a Figura 6.4 mostram graficamente os resultados da Tabela 6.15.

Tabela 6.15: Análise de sensibilidade para o Modelo M4

Modelo M4					
	-25,00%	-12,50%	0,00%	12,50%	25,00%
Sensibilidade à Tarifa de Energia Elétrica					
Custo Evitado [R\$]	1.878,55	2.191,64	2.504,73	2.817,82	3.130,91
Custo de Equipamento [R\$]	20.805,38	20.805,38	20.805,38	20.805,38	20.805,38
TMA [%]	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%
VPL [R\$]	-4.374,77	-1.951,57	471,64	2.894,84	5.318,04
TIR [%]	6,44%	8,46%	10,36%	12,19%	13,94%
Pay Back [anos]	11,08	9,49	8,31	7,38	6,65
Sensibilidade ao Custo de Equipamento					
Custo Evitado [R\$]	2.504,73	2.504,73	2.504,73	2.504,73	2.504,73
Custo de Equipamento [R\$]	15.604,03	18.204,71	20.805,38	23.406,05	26.006,72
TMA [%]	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%
VPL [R\$]	5.200,13	2.835,88	471,64	-1.892,61	-4.256,86
TIR [%]	15,09%	12,44%	10,36%	8,67%	7,26%
Pay Back [anos]	6,23	7,27	8,31	9,34	10,38
Sensibilidade à TMA					
Custo Evitado [R\$]	2.504,73	2.504,73	2.504,73	2.504,73	2.504,73
Custo de Equipamento [R\$]	20.805,38	20.805,38	20.805,38	20.805,38	20.805,38
TMA [%]	7,50%	8,75%	10,00%	11,25%	12,50%
VPL [R\$]	4.399,13	2.273,47	471,64	-1.061,70	-2.371,33
TIR [%]	10,36%	10,36%	10,36%	10,36%	10,36%
Pay Back [anos]	8,31	8,31	8,31	8,31	8,31

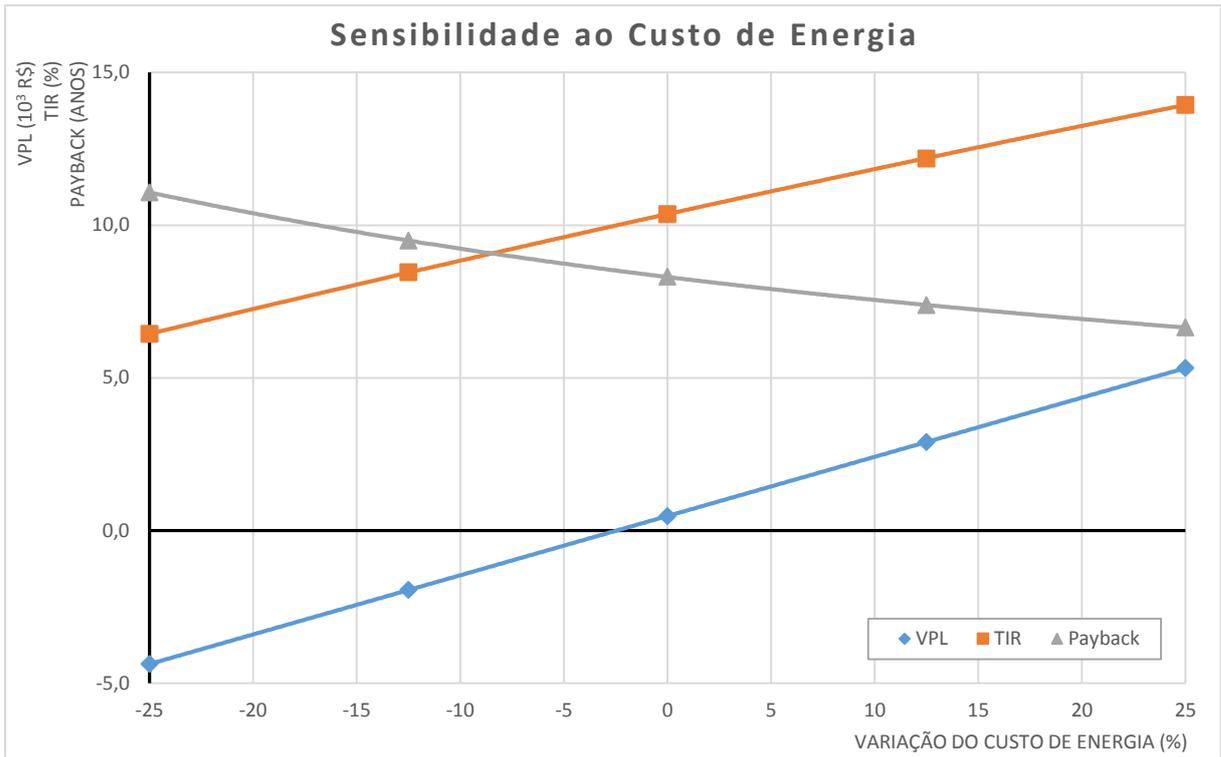


Figura 6.2: Análise de sensibilidade com relao  Tarifa de Eletricidade (caso M4-C2).

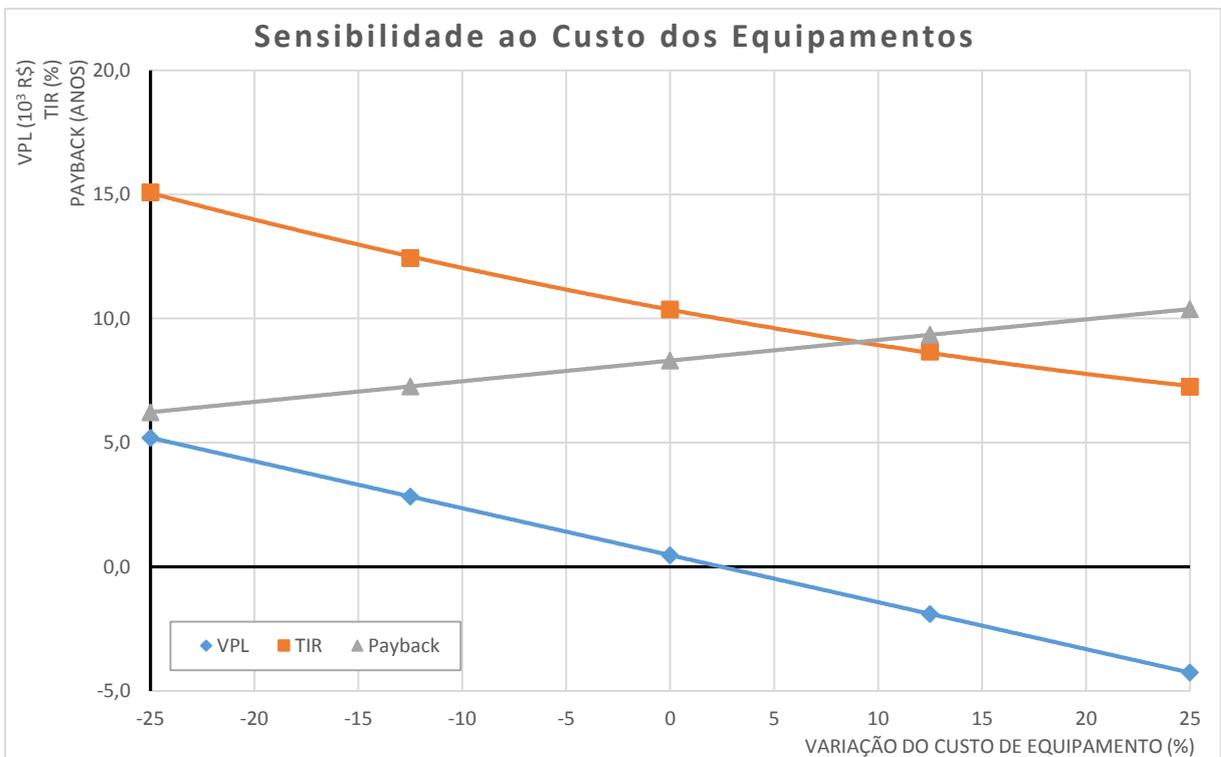


Figura 6.3: Análise de sensibilidade com relao  Custo de Equipamento (caso M4-C2).

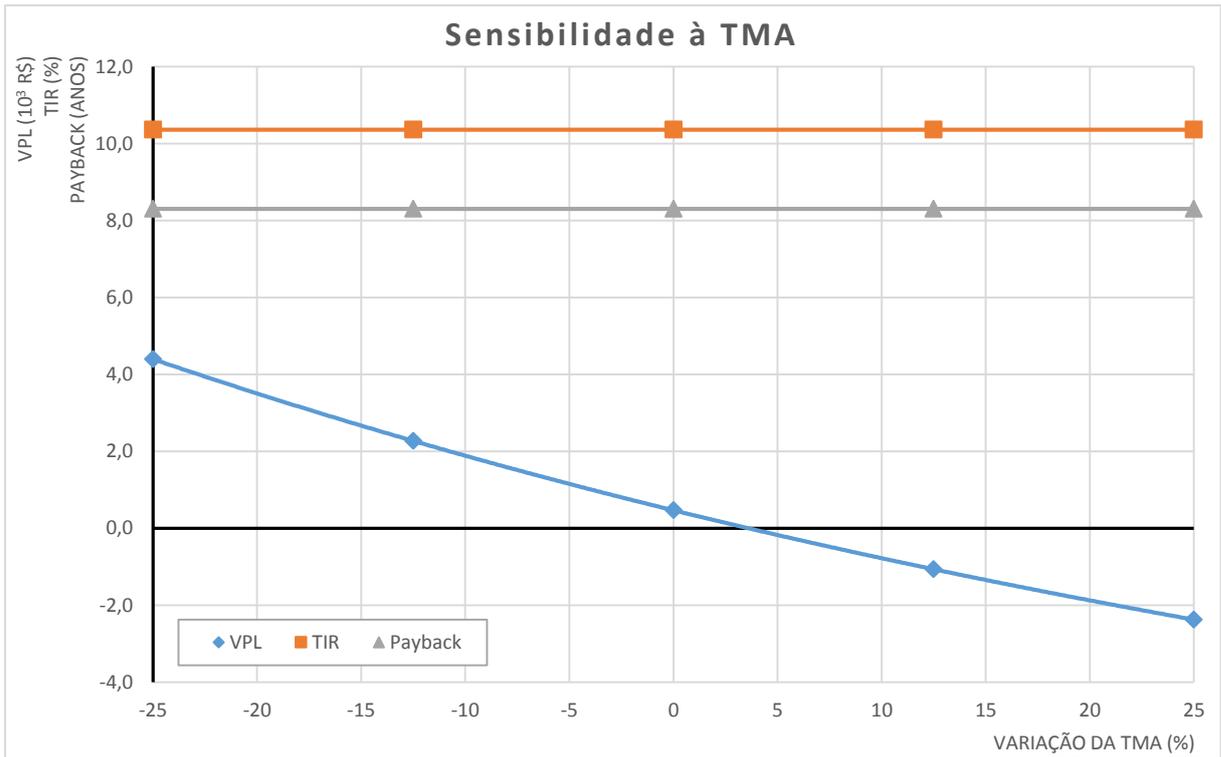


Figura 6.4: Análise de sensibilidade com relação ao Custo à TMA.

Capítulo 7

7. Conclusões e Sugestões

7.1 Conclusões

Conforme os resultados das simulações executadas neste trabalho, pôde-se observar que a aplicação da Ventilação Sob Demanda baseada na concentração interna de dióxido de carbono (DCV), pode melhorar as condições internas de conforto, permitindo um melhor controle tanto da temperatura como da umidade relativa.

De forma geral, principalmente quanto ao Método da Qualidade do Ar Interno (IAQP), a redução da vazão do ar externo de renovação pode melhorar o controle da temperatura em dias frios, sem uso de serpentinas de aquecimento e, conseqüentemente, consumo adicional de energia. Pela maior recirculação do ar de retorno, parte do calor gerado internamente é novamente insuflado nos ambientes sem prejuízo para a salubridade do ar, visto que a concentração de CO₂ é continuamente monitorada pelo controlador. Também devido à menor necessidade de ar externo, o controle da umidade interna é mais preciso, em um clima úmido como o de São Paulo.

Em dias quentes, o DCV pode reduzir a carga térmica sobre a Serpentina de Resfriamento e Desumidificação (SRD) nos momentos críticos do dia, em função de uma redução na ocupação dos ambientes e de uma menor necessidade de ar externo de renovação. Porém, conforme se mostrou, em momentos em que a temperatura externa é mais baixa, uma menor vazão de ar externo como a utilizada pelo DCV no início da manhã, quando as concentrações internas de CO₂ ainda são baixas, faz com que o consumo de energia aumente. Devido à baixa temperatura externa nestes momentos, a vazão de ar externo de renovação ajuda a neutralizar o calor gerado internamente e a reduzir a carga térmica sobre a SRD.

Este resultado contraria totalmente o senso comum, onde se acredita que os sistemas de condicionamento de ar devem operar com o mínimo de ar externo ao longo de todo o tempo. Conforme foi mostrado, apenas nos momentos mais quentes do dia a redução de ar externo proporcionada pelo DCV poderá resultar em redução de consumo.

Por outro lado, conforme se observou nas Seções 5.2, 5.3 e 5.4, o DCV produz um “achatamento” nas curvas de carga térmica, reduzindo seus picos e fazendo com que os compressores trabalhem em um regime de potência mais uniforme ao longo do dia. Isto é particularmente interessante em casos de faturamento de energia por demanda de potência e não por consumo. Neste caso, a instalação estaria menos sujeita a oscilações bruscas de demanda, devido a picos de calor, e permitiria até mesmo a redução da demanda contratada junto à concessionária. Porém, esta modalidade tarifária é muito pouco frequente no setor de edificações comerciais no Brasil.

Porém, ao longo de toda a análise de resultados, observou-se principalmente do comportamento do Modelo M0 (ar 100% renovado), que a alta vazão de ar externo diminuiu a temperatura no inverno e aumentou a umidade relativa no verão, nos ambientes internos. Em parte, estes efeitos continuaram presentes na combinação do DCV com o EAE e as condições de conforto em alguns ambientes foram comprometidas, principalmente aqueles com ocupação mais intensa. Apesar do EAE modular a vazão de ar externo para atingir as condições adequadas de insuflação no inverno, promovendo o resfriamento gratuito, ainda foram observadas temperaturas abaixo de 24°C no início da manhã e no final da tarde, quando os ganhos de calor pela envoltória eram baixos. No entanto, este efeito não chega a comprometer seriamente as condições de conforto.

Já no verão, quanto à umidade relativa, tanto no Cenários C1 como no C2 observou-se índices bastante altos, em torno de 70% a 80%, nos ambiente Convivência e Auditório, devido a uma série de fatores. Em primeiro lugar, a umidade relativa interna é fortemente dependente da vazão de ar externo no clima úmido de São Paulo. Em segundo lugar, a taxa de renovação de ar deve ser alta para atender às normas de conforto térmico. Em terceiro, a geração interna de umidade nesses ambientes é alta devido à ocupação intensa. Esses três fatores geram um ambiente com alta carga latente e, conseqüentemente, baixo fator de calor sensível, em uma condição de umidade externa alta. Além disso, em quarto lugar, o equipamento condicionador de ar é dimensionado para a condição de máximo ganho de calor sensível, que frequentemente ocorre em um dia quente e seco. Finalmente, em quinto lugar, o controle termostático do

equipamento permitirá que a SRD remova a umidade do ar apenas até que a temperatura configurada seja atingida e o compressor seja desligado por temperatura.

Assim, o equipamento condicionador de ar não é capaz de atender o fator de calor sensível do ambiente e uma maior taxa de desumidificação apenas seria possível com o reaquecimento do ar de insuflação, o que aumentaria consideravelmente o consumo de energia. Portanto, no caso da Convivência e do Auditório, o EAE irá aumentar a umidade relativa interna sempre que a umidade externa estiver alta, fato bastante frequente no verão paulistano.

Outro fator que não permitiu a correção do problema da umidade nas simulações, foi o tipo de controle utilizado no algoritmo EnergyPlus, que habilita o DCV ou o EAE. Se o controlador identifica uma condição externa favorável ao EAE, este passa a ter prioridade sobre o DCV. Portanto, não existe a opção do controle do ar externo voltar ao DCV caso seja identificada umidade interna excessiva, o que resolveria o problema. O objeto *Controller:OutdoorAir* até possui uma opção para limitar a umidade relativa interna, porém a ação tomada quando a umidade ultrapassa o limite se resume a reduzir a vazão de ar externo a um valor fixo, como a taxa de norma por exemplo. Em geral, esta ação não resolve o problema pois a taxa de norma ainda mantém a umidade alta.

O ideal seria que, após o EAE entrar em operação e uma condição de alta umidade fosse detectada, o controle voltasse ao DCV, que teria meios de reduzir o ar externo a zero, pois a concentração de CO₂ estaria baixa, até que a umidade voltasse ao nível especificado. Este tipo de controle só seria possível através de uma cossimulação (simulação em dois programas diferentes, em paralelo, que trocam dados entre si a cada incremento de tempo), como por exemplo, acoplando o EnergyPlus ao Matlab. Dessa forma, toda a simulação térmica seria executada no EnergyPlus, enquanto toda a lógica de controle seria feita no Matlab. Porém, isso é assunto para um trabalho inteiro de mestrado.

De qualquer forma, em ambientes como a Convivência e o Auditório, não é aconselhável a utilização do EAE, a menos que seu uso seja combinado com algum dispositivo de desumidificação passiva, como os desumidificadores dessecativos. Caso contrário, o DCV deverá ser aplicado de forma individual, visto que melhora o controle da umidade. Nos demais ambientes, o EAE causou leve aumento na umidade relativa no início da manhã, porém a ação do DCV minimiza este efeito no restante do dia. Assim, a despeito do problema da umidade relativa, a combinação do DCV com o EAE cumpriu o objetivo inicial, permitindo uma satisfatória redução de consumo.

Finalmente, quanto aos resultados numéricos, pode-se afirmar que a aplicação individual do DCV-IAQP (Modelo 4) na edificação estudada, causa um aumento de 0,90% no consumo anual de energia. Por outro lado, o DCV-IAQP combinado com o EAE com controle diferencial de temperatura, proporciona uma redução de 12,20% no consumo anual do edifício (Modelo M4 – Cenário C1). Em termos financeiros, considerando a tarifa Horo-Sazonal Azul, a economia seria de R\$ 2.504,73 por ano. Para a instalação dos controles em todo o edifício, cuja capacidade total dos equipamentos é de 53,1 TR, seria necessário um investimento de R\$ 20.805,38, resultando em um custo incremental de R\$ 391,81 R\$/TR.

Considerando que a vida útil dos equipamentos é de 20 anos e que os investidores esperam uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 10% (já considerando a inflação) com a implantação do projeto, tem-se um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 471,64, uma Taxa interna de Retorno (TIR) de 10,36% e um tempo de retorno (Payback Simples) de 8,31 anos. Apesar dos indicadores financeiros não serem bons, um projeto como esse possui várias vantagens intangíveis como os benefícios que uma simples redução de consumo traz ao meio ambiente. Por outro lado, com a entrada em vigor do novo sistema de tarifação em 2015, as bandeiras tarifárias, projetos de eficiência energética como o desenvolvido aqui podem se tornar mais atrativo.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Efetuar as simulações do modelo apresentado em outras localidades, com características climáticas diferentes;
- Utilizar outros tipos de sistemas de condicionamento de ar no modelo, como por exemplo os sistemas VAV, VRV, água gelada, etc.;
- Verificar alternativas à compressão mecânica de vapor, como o uso de condicionadores evaporativos em conjunto com desumidificadores dessecativos;
- Utilizar o modelo em uma Cossimulação entre EnergyPlus e Matlab, e implementar estratégias de controle não permitidas pelos modelos nativos EnergyPlus;
- Efetuar análises econômicas nos resultados obtidos das Cossimulações.

Referências Bibliográfica

- ABNT (2005a). *ABNT NBR 15.220-3:2005 - Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2005b). *ABNT NBR 15.220-1:2005 - Desempenho Térmico de Edificações - Parte 1: Definições, Símbolos e Unidades*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2005c). *ABNT NBR 15.220-2:2005 - Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de Cálculo da Transmitância Térmica, da Capacidade Térmica, do Atraso Térmico e do Fator Solar de Elementos e Componentes de Edificações*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2008a). *ABNT NBR 16.401-1:2008 - Instalações de Ar Condicionado - Sistemas Centrais e Unitários - Parte: Projeto das Instalações*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2008b). *ABNT NBR 16.401-2:2008 - Instalações de Ar Condicionado - Sistemas Centrais e Unitários - Parte 2: Parâmetros de Conforto*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2008c). *ABNT NBR 16.401-3:2008 - Instalações de Ar Condicionado - Sistemas Centrais e Unitários - Parte 3: Qualidade do Ar Interior*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- AES Eletropaulo. *Web Site AES Eletropaulo*. Disponível em: <<https://www.aeseletropaulo.com.br/Paginas/aes-eletropaulo.aspx>>. Acesso em: 22 jul. 2014.
- Amorim, C. N. D.; Braga, D. K.; Lima, T. B. S.; et al. (2007). *Edifício Público Sustentável: Palácio do Itamaraty*. In: ENCAC 2007, . Proceedings of IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, Ouro Preto-MG, Brasil.

- ANEEL (2005). *Cadernos Temáticos ANEEL - Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica*. Brasília-DF, Brasil: Agência Nacional de Energia Elétrica, Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/caderno4capa.pdf>>.
- ANEEL (2013). *Resolução Homologatória nº 1.563, de 2 de Julho de 2013*. Diário Oficial da União. [S.l: s.n.]. . Acesso em: 15 jan. 2014.
- ANEEL (2014). *Web Site Agência Nacional de Energia Elétrica*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=758>>. Acesso em: 19 out. 2014.
- ANVISA (1998). *Portaria nº 3.532, de 28 de Agosto de 1998*. Agência Nacional de Vigilância Sanitária - Ministério da Saúde. [S.l: s.n.]. Disponível em: <http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1998/prt3523_28_08_1998.html>. Acesso em: 22 jun. 2014.
- Apte, M. G. M. G. (2006). *A Review of Demand Control Ventilation*. Ashrae Standard. Berkeley-CA, USA.
- ASHRAE (1989a). *ASHRAE Standard 62.1:1989 - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta-GA, USA. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (1989b). *ASHRAE Standard 90.1:1989 - Energy Standard for Buildings Except Low-rise Residential Buildings*. Atlanta-GA, USA. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (2004). *ASHRAE Standard 55:2004 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta-GA, USA. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Disponível em: <http://www.techstreet.com/ashrae/products/1868610?utm_source=promotion&utm_medium=landingpage&utm_campaign=86179&utm_term=86179&utm_content=86179&ashrae_auth_token=#jumps>. Acesso em: 20 abr. 2014.
- ASHRAE (2007). *2007 ASHRAE Handbook - Applications*. SI ed. Atlanta-GA, USA. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (2008). *2008 ASHRAE Handbook - HVAC Systems & Equipment*. SI ed. Atlanta-GA, USA. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

- ASHRAE (2009). **2009 ASHRAE Handbook - Fundamentals**. SI ed. Atlanta-GA, USA. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (2010a). **ASHRAE Standard 62.1:2010 - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. Atlanta-GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (2010b). **ASHRAE Standard 90.1:2010 - Energy Standard for Buildings Except Low-rise Residential Buildings**. Atlanta-GA, USA. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (2012). **International Weather for Energy Calculations 2.0 (IWECC Weather Files) DVD**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ISBN 1936504200.
- ASHRAE (2013). **ASHRAE Standard 55:2013 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta-GA, USA. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Disponível em: <http://www.techstreet.com/ashrae/products/1868610?utm_source=promotion&utm_medium=landingpage&utm_campaign=86179&utm_term=86179&utm_content=86179&ashrae_auth_token=#jumps>. Acesso em: 20 abr. 2014.
- BEN (2010). **Balanço Energético Nacional 2010: Ano base 2009**. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: EPE - Empresa de Pesquisa Energética, MME - Ministério de Minas e Energia, Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf>.
- BEN (2011). **Balanço Energético Nacional 2011: Ano base 2010**. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: EPE - Empresa de Pesquisa Energética, MME - Ministério de Minas e Energia, Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>.
- BEN (2012). **Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011**. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: EPE - Empresa de Pesquisa Energética, MME - Ministério de Minas e Energia, Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>.
- BEN (2013). **Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: EPE - Empresa de Pesquisa Energética, MME - Ministério de Minas e Energia, Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>.

- BEN (2014). *Balanco Energético Nacional 2014: Ano base 2013*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: EPE - Empresa de Pesquisa Energética, MME - Ministério de Minas e Energia, Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>.
- Bendixsen, T.; Young, G. (2005). *Commissioning of Offshore Oil and Gas Projects: The Manager's Handbook*. Bloomington, Ind.: AuthorHouse, ISBN 9781418443801.
- Bhandari, M.; Shrestha, S.; New, J. (2012). *Evaluation of weather datasets for building energy simulation*. Energy and Buildings, [S.l.], v. 49, p. 109–118. ISSN 03787788. . Acesso em: 30 jun. 2012.
- Brasil (2001). *Lei nº 10.295, de 17 de Outubro de 2001*. Diário Oficial da União. [S.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/LEIS_2001/L10295.htm>. Acesso em: 22 jun. 2014.
- Buzelin, L. O. S.; Amico, S. C.; Vargas, J. V. C.; et al. (2005). *Experimental development of an intelligent refrigeration system*. International Journal of Refrigeration, [S.l.], v. 28, n. 2, p. 165–175.
- CARB/DHS (2003). *California Portable Classrooms Study: Project Executive Summary*. . [S.l.]: California Air Resources Board and California Department of Health Services.
- Carlo, J. C. (2005). *Processamento de Arquivos Climáticos para Simulação do Desempenho Energético de Edificações*. . [S.l.]: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.
- Cavalcante, R. de C. D. (2010). *Simulação Energética para a Análise da Arquitetura de Edifício de Escritórios Além da Comprovação da Conformidade com Códigos de Desempenho*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). São Paulo-SP, Brasil: Universidade de São Paulo - USP,
- Congradac, V.; Kulic, F. (2009). *HVAC system optimization with CO2 concentration control using genetic algorithms*. Energy and Buildings, [S.l.], v. 41, n. 5, p. 571–577.
- CONPET (2014). *Consulte o modelo de equipamento contemplado com o Selo CONPET. - Conpet*. Disponível em: <http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/conteudo-gerais/selo-conpet.shtml>. Acesso em: 24 jun. 2014.

- Crawley, D. B.; Hand, J. W.; Kummert, M.; et al. (2008a). *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Building and Environment, [S.l.], v. 43, n. 4, p. 661–673. ISSN 0360-1323. . Acesso em: 24 fev. 2011.
- Crawley, D. B.; Hand, J. W.; Kummert, M.; et al. (2008b). *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Building and Environment, [S.l.], v. 43, n. 4, p. 661–673.
- Crawley, D. B.; Lawrie, L. K.; Pedersen, C. O.; et al. (2004). *EnergyPlus: An Update*. In: SIMBUILD 2004, Proceedings of Building Sustainability and Performance Through Simulation, Boulder-CO, USA.
- Crawley, D. B.; Lawrie, L. K.; Winkelmann, F. C.; et al. (2001). *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*. Energy and Buildings, [S.l.], v. 33, n. 4, p. 319–331.
- Curtiss, P. S.; Kreider, J. F.; Brandemuehl, M. J. (1994). *Local and global control of commercial building HVAC systems using artificial neural networks*. In: ACC 1994, . Proceedings of American Control Conference, Baltimore, Maryland-US.
- EIA (2006). *Key World Energy Statistics - 2006*. Paris-França: U.S. Energy Information Administration (EIA), Disponível em: <<http://www.env-edu.gr/Documents/Key%20World%20Energy%20Statistics%202006.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2014.
- Eletrobrás (2014). *Procel - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica*. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp>>. Acesso em: 24 jun. 2014.
- Encon (2014). *Website Grupo Encon Automação Predial*. Disponível em: <<http://www.grupoencon.com/>>. Acesso em: 31 jul. 2014.
- EnergyPlus (2013a). *EnergyPlus Engineering Reference - TheReference to EnergyPlus Calculations*. Berkeley-CA, USA: University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- EnergyPlus (2013b). *Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*. Berkeley-CA, USA: University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- EnergyPlus (2013c). *Guide for ModuleDevelopers*. Berkeley-CA, USA: University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

- EnergyPlus (2013d). *EnergyPlus Data Sets*. Berkeley-CA, USA: University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. [S.l.]: Danish Technical Press, ISBN 9788757103410.
- Fargus, R. S.; Chapman, C. (1998). *A commercial PI-neural controller for the control of building services plant*. In: CONTROL 1998, . Proceedings of UKACC International Conference on Control, Swansea, United Kingdom.
- Forejt, L.; Hensen, J.; Drkal, F.; et al. (2006). *Weather Data Around the World for Design of Field Hospital HVAC*. Proceedings of 17th International Air-Conditioning and Ventilation Conference.
- Frota, A. B.; Schiffer, S. R. (2006). *Manual de conforto térmico*. Studio Nobel, ISBN 9788585445393.
- G1 (2013). *Planeta está em “zona de perigo” com alta concentração de CO2, diz ONU*. Disponível em: <<http://g1.globo.com/natureza/noticia/2013/05/planeta-esta-em-zona-de-perigo-com-alta-concentracao-de-co2-diz-onu.html>>. Acesso em: 2 jun. 2013.
- Gales, B.; Kander, A.; Malanima, P.; et al. (2007). *North versus South: Energy transition and energy intensity in Europe over 200 years*. European Review of Economic History, [S.l.], v. 11, n. 2, p. 219–253. ISSN 1361-4916, 1474-0044. Acesso em: 22 maio. 2012.
- Geller, H.; Schaeffer, R.; Szklo, A.; et al. (2004). *Policies for advancing energy efficiency and renewable energy use in Brazil*. Energy Policy, [S.l.], v. 32, n. 12, p. 1437–1450. ISSN 03014215. Acesso em: 1 ago. 2013.
- Ghisi, E.; Gosch, S.; Lamberts, R. (2007). *Electricity end-uses in the residential sector of Brazil*. Energy Policy, [S.l.], v. 35, n. 8, p. 4107–4120. ISSN 03014215. Acesso em: 1 ago. 2013.
- Goulart, S. V. G.; Lamberts, R.; Samanta Firmino (1998). *Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras*. 2ª ed. Florianópolis-SC, Brasil: Núcleo de Pesquisa em Construção - UFSC, Disponível em: </content/ABAAABBPAAC/dados-climaticos>. Acesso em: 17 jun. 2012.
- Hall, I.; Prairie, R.; Anderson, H.; et al. (1978). *Generation of Typical Meteorological Years for 26 SOLMET Stations*. Albuquerque-NM, USA: Sandia National Laboratories,

- Hensen, J. (1999). *Simulation of building energy and indoor environmental quality - some weather data issues*. Proceedings of International Workshop on Climate Data and their Applications in Engineerin, Prague, Czech Republic.
- Hong, T.; Fisk, W. J. (2009). *Assessment of energy savings potential from the use of demand controlled ventilation in general office spaces in California*. Building Simulation, v. 3, n. 2, p. 117–124.
- Horsley, D. M. C. (1998). *Process Plant Commissioning: A User Guide*. IChemE, ISBN 9780852953983.
- IBGE (2014). *Indicadores IBGE - Contas Nacionais Trimestrais - Indicadores de Volume e Valores Correntes - Abril / Junho 2014*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Contas_Nacionais/Contas_Nacionais_Trimestrais/Tabelas_Completas/Tab_Compl_CNT.zip>. Acesso em: 16 out. 2014.
- Inard, C.; Pfafferott, J.; Ghiaus, C. (2011). *Free-running temperature and potential for free cooling by ventilation: A case study*. Energy and Buildings, [S.l.], v. 43, n. 10, p. 2705–2711. ISSN 03787788. Acesso em: 1 ago. 2013.
- INMET (2012) *INMET - Instituto Nacional de Meteorologia*. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 3 jul. 2012.
- Inmetro (2014). *PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem*. Disponível em: <<http://www2.inmetro.gov.br/pbe/>>. Acesso em: 24 jun. 2014.
- ISO (1994). *ISO 7.730:1994 - Moderate Thermal Environments -Determination of PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*. Geneva: ISO - International Organization for Standardization, Disponível em: <http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/management_and_leadership_standards/specific-applications_energy.htm>. Acesso em: 1 maio. 2012.
- ISO (2011). *ISO 50.001:2011 - Energy Management*. [S.l.]: ISO - International Organization for Standardization,
- Kerrisk, J. F. (1981). *Weighting factors in the DOE-2 computer program*. Springfield, VA. NTIS.

- LabEEE (2012). *Laboratório de Eficiência Energética em Edificações / Laboratório de Eficiência Energética em Edificações*. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/>>. Acesso em: 17 jun. 2012.
- Lagios, K.; Niemasz, J.; Reinhart, C. F. (2010). *Animated Building Performance Simulation (ABPS) – Linking Hinceros/Grasshopper with Radiance/DaySim*. In: SIMBUILD 2010. Proceedings of 4th National Conference of IBPSA-USA, New York-NY, USA.
- Lamberts, L.; Westphal, F. (2000). *Energy Efficiency in Buildings in Brazil*. Proceedings of Symposium on Construction & Environment – Theory Into Practice, São Paulo-SP, Brasil.
- Lee, K.-P.; Chen, H.-L. (2013). *Analysis of energy saving potential of air-side free cooling for data centers in worldwide climate zones*. Energy and Buildings. v. 64, p. 103–112. ISSN 03787788. Acesso em: 1 ago. 2013.
- Maile, T.; Fischer, M.; Bazjanac, V. (2007). *Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective*. CIFE - Center for Integrated Facility Engineering, Stanford-CA, EUA.
- Maripuu, M. (2009). *Demand Controlled Ventilation (DCV) Systems in Commercial Buildings*. Göteborg. Chalmers University of Technology, ISBN 9789173852562.
- MathWorks (2014). *MathWorks - MATLAB and Simulink for Technical Computing - A*. Disponível em: <http://www.mathworks.com/index.html?s_tid=gn_logo>. Acesso em: 5 jul. 2014.
- Memarzadeh, F. (2012). *Literature Review of the Effect of Temperature and Humidity on Viruses*. ASHRAE Transactions - American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers.
- Mendes, N.; Lamberts, R.; Neto, J. A. B. da C. (2001). *Building simulation in brazil*. In: BUILDING SIMULATION 2001. Proceedings of Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- Mendes, N.; Oliveira, G. H. C.; Araújo, H. X.; et al. (2003). *A MatLab-Based Simulation Tool for Building Thermal Performance Analysis*. In: BUILDING SIMULATION 2003. Proceedings of Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands.

- Mitalas, G. P.; Stephenson, D. G. (1967). *Room Thermal Response Factors*. ASHRAE Transactions, [S.l.], National Research Council of Canada, Division of Building Research. v. 73, n. 1, p. 15. . Acesso em: 7 jun. 2014.
- Moraes, L. R. (1989). *Energia na Edificação*. Arquitetura, Ar Condicionado, Conservação de Energia.
- NOAA (2012). *NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration*. Disponível em: <<http://www.noaa.gov/>>. Acesso em: 3 jul. 2012.
- Ordenes, M.; Pedrini, A.; Ghisi, E.; et al. (2003). *Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no VISUALDOE-3.1*. Florianópolis-SC, Brasil. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Biblioteca_Materiais_VisualDOE.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2011.
- Pavlovas, V. (2004). *Demand controlled ventilation: A case study for existing Swedish multifamily buildings*. Energy and Buildings, v. 36, n. 10, p. 1029–1034. ISSN 0378-7788. Acesso em: 31 jan. 2011.
- Pereira, I.; Alves, T.; Pinheiro, R.; et al. (2004). *Metodologia de Tratamento de Dados Climáticos para Inserção em Softwares de Simulação Energética de Edifícios*. In: ENTAC 2004. Proceedings of I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável & X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo-SP, Brasil.
- Pérez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. (2008). *A review on buildings energy consumption information*. Energy and Buildings. v. 40, n. 3, p. 394–398. ISSN 0378-7788. . Acesso em: 19 maio. 2011.
- Persily, A. K.; Gorfain, J.; Brunner, G. (2005). *Ventilation rates in U.S. office buildings from the EPA base study*. In: INDOOR AIR 2005. Proceedings of The Tenth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Beijing, China.
- Petrone, G.; Cammarata, L.; Cammarata, G. (2011). *A multi-physical simulation on the IAQ in a movie theatre equipped by different ventilating systems*. Building Simulation. v. 4, n. 1, p. 21–31. ISSN 1996-3599, 1996-8744. Acesso em: 20 out. 2014.

- Pietrobon, C. E.; Lamberts, R.; Pereira, F. O. R. (1999). *Tratamentos de Elementos Climáticos para a Climatologia das Edificações: o caso de Maringá*. Dissertação de Mestrado. Maringá-PR, Brasil: Universidade Estadual de Maringá - UEM, Departamento de Engenharia Civil,
- Pirani, M. J.; Venturini, O.; Simões, A. A.; et al. (2006). *Refrigeração e Ar Condicionado*. In: Eletrobrás, Procel Educação, F. (Org.). In: Conservação de Energia - Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações. Itajubá-MG, Brasil: Universidade Federal de Itajubá, 2006. 3º ed.
- PNEf (2012). *Plano Nacional de Eficiência Energética - PNEf*. Brasília-DF, Brasil: MME - Ministério das Minas e Energia, Departamento de Desenvolvimento Energético, Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2010/PNEf_-_Premissas_e_Dir._Basicas.pdf>. Acesso em: 25 maio. 2011.
- Prado, R. T. (2003). *Conforto Térmico*. Monografia (MBA em Gerenciamento de Facilidades). São Paulo-SP, Brasil: Universidade de São Paulo - USP.
- Procel (2006). *Avaliação dos Resultados do Procel 2005*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: Eletrobrás/Procel, Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>.
- Procel (2013). *Resultados PROCEL 2013 - Ano Base 2012*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: Eletrobrás - PROCEL, Disponível em: <<file:///C:/Users/Daniel/Downloads/Resultados%20do%20Procel%202013%20-%20Ano%20base%202012%20-%20Relat%C3%B3rio%20Completo.pdf>>.
- Ramallo-González, A. P.; Eames, M. E.; Coley, D. A. (2013). *Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions*. Energy and Buildings. v. 60, p. 174–184. ISSN 03787788. Acesso em: 5 jul. 2014.
- Römer, J. C. (2001). *Simulation of Demand Controlled Ventilation in a Low-Energy House*. In: BUILDING SIMULATION 2001. Proceedings of The Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

- Roriz, M. (2012). *Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros*. . São Carlos-SP, Brasil: ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/sobre_epw.pdf>.
- Rosa, L. P.; Lomardo, L. L. B. (2004). *The Brazilian energy crisis and a study to support building efficiency legislation*. Energy and Buildings, [S.l.], v. 36, n. 2, p. 89–95. ISSN 0378-7788. Acesso em: 1 ago. 2013.
- Schell, M. B.; Turner, S. C.; Shim, O. (1998). *Application of CO₂-Based Demand Controlled Ventilation Using ASHRAE Standard 62 : Optimizing Energy Use and Ventilation*. Atlanta-GA, USA. ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Schell, M.; Inthout, D. (2001). *Demand Control Ventilation Using CO₂*. ASHRAE Journal. n. February.
- Seem, J. E.; House, J. M. (2010). *Development and evaluation of optimization-based air economizer strategies*. Applied Energy. v. 87, n. 3, p. 910–924. ISSN 03062619. Acesso em: 26 jun. 2014.
- Shirey, D. B.; Henderson, H. I. (2004). *Dehumidification at Part Load*. ASHRAE Journal, v. 46, n. 4, p. 42–48. ISSN 00012491.
- Spengler, J.; Sexton, K. (1983). *Indoor air pollution: a public health perspective*. Science. v. 221, n. 4605, p. 9–17.
- Stamper, E. (1977). *Weather Data*. ASHRAE Journal. p. 47.
- Stoecker, W. F.; Jabardo, J. M. S. (2002). *Refrigeração Industrial*. 2º ed. São Paulo-SP, Brasil: Edgard Blücher,
- Taylor, S. T.; Cheng, C. H. (2010). *Economizer High Limit Controls and Why Enthalpy Economizers Don't Work*. ASHRAE Journal. p. 1 – 11.
- Thevenard, D. J.; Brunger, A. P. (2002). *The Development of Typical Weather Years for International Locations: Part I, Algorithms*. ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin, v. 108, n. 2, p. 376–383.

- Trčka, M.; Hensen, J. L. M.; Wetter, M. (2010). *Co-simulation for performance prediction of integrated building and HVAC systems – An analysis of solution characteristics using a two-body system*. Simulation Modelling Practice and Theory, v. 18, n. 7, p. 957–970. ISSN 1569190X.
- UNEP (2012). *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*. Disponível em: <<http://en.openei.org/apps/SWERA/>>. Acesso em: 16 jun. 2012.
- US-DOE (2011a). *2010 Building Energy Data Book*. Washington-DC, USA: U.S. Department of Energy - Building Technologies Program,
- US-DOE (2011b). *Building Technologies Program: EnergyPlus Energy Simulation Software*. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 26 maio. 2011.
- US-DOE (2012b). *EnergyPlus Energy Simulation Software: Weather Data Sources*. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm>. Acesso em: 16 jun. 2012.
- Valdes, J. C. A.; Nodal, Y. V.; Rodríguez, M. L.; et al. (2009). *Procedure for the Optimization of the Conceptual Design of Centralized Air Conditioning Chiller Water Systems*. In: ECOS 2009, . Proceedings of 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Foz do Iguaçu-PR, Brasil.
- Warren, B. F.; Harper, N. C. (1991). *Demand controlled ventilation by room CO2 concentration: a comparison of simulated energy savings in an auditorium space*. Energy and Buildings, [S.l.], v. 17, n. 2, p. 87–96. ISSN 0378-7788. . Acesso em: 17 maio. 2011.
- Wilcox, S.; Marion, W. (2008). *Users Manual for TMY3 Data Sets*. Golden-CO, USA: NREL - National Renewable Energy Laboratory, Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43156.pdf>>.