

ROSILENE REGOLÃO BRUGNERA

Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com
estratégias de ventilação híbrida

Dissertação apresentada ao Instituto de
Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração:
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientadora:
Prof^ª. Dr^ª. Karin Maria Soares Chvatal

Apoio:
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado
de São Paulo - FAPESP

Versão corrigida

São Carlos
2014

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

B891p Brugnera, Rosilene Regolão
Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com estratégias de ventilação híbrida / Rosilene Regolão Brugnera; orientadora Karin Maria Soares Chvatal. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Ventilação híbrida. 2. Simulação computacional.
3. Eficiência energética. I. Título.



RELATÓRIO DE DEFESA

Aluno: 102131 - 5396996 - 1 / Página 1 de 1

Relatório de defesa pública de Dissertação do(a) Senhor(a) Rosilene Regolão Brugnera no Programa: Arquitetura e Urbanismo, do(a) Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

Aos 05 dias do mês de fevereiro de 2014, no(a) Auditório Paulo de Camargo realizou-se a Defesa da Dissertação do(a) Senhor(a) Rosilene Regolão Brugnera, apresentada para a obtenção do título de Mestra intitulada:

"Potencial de economia de energia em edifício de escritórios com estratégias de ventilação híbrida"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Karin Maria Soares Chvatal	Presidente	IAU - USP	<u>APROVADA</u>
Kelen Almeida Dornelles	Titular	Externo	<u>APROVADA</u>
Victor Figueiredo Roriz	Titular	FIDP - Externo	<u>APROVADA</u>

Resultado Final: APROVADA

Parecer da Comissão Julgadora *

Eu, _____, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as). São Carlos, aos 05 dias do mês de fevereiro de 2014.

Kelen Almeida Dornelles

Victor Figueiredo Roriz

Karin Maria Soares Chvatal
Presidente da Comissão Julgadora

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em _____, e, portanto, o(a) aluno(a) faz jus ao título de Mestra em Ciências obtido no Programa Arquitetura e Urbanismo - Área de concentração: Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.

Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Aos meus pais, por todo o amor, dedicação e
esforço em me tornarem a pessoa que sou hoje.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à **Deus**, em primeiro lugar, por ter me dado força e coragem de enfrentar todas as dificuldades e lutas que estariam por vir e por ter me proporcionado vida e saúde para que este sonho se concretizasse.

Agradeço aos meus pais, **Edgard e Rosilene**, por todo o incentivo e auxílio no que foi necessário, sendo ambos um dos grandes motivos por eu ter chegado até aqui.

Agradeço ao meu marido, **Andrey**, por todo carinho, amor, paciência e força que me proporcionou ao longo de toda essa caminhada, fazendo o possível e, muitas vezes, o impossível, para me ajudar a conquistar os meus sonhos, que na verdade são nossos.

Agradeço à minha **família** como um todo, irmãos, cunhados, sobrinhas, sogros, tios que tanto se fazem presente em minha vida e que sempre me incentivaram a continuar, tendo sempre a paciência de entender que em muitos momentos eu tive que estar ausente, para que pudesse chegar aonde cheguei.

Agradeço aos meus **queridos amigos** de muitos anos, e aos mais recentes (cujos nomes não vou citar senão posso me esquecer de alguém), por toda a força de sempre, ao **pessoal do IAU** como um todo que, de certa forma, fazem parte de tudo o que se passou ao longo dessa trajetória.

Agradeço à Professora **Karin Chvatal**, por toda dedicação, incentivo e auxílio em tudo o que foi necessário ao longo deste mestrado e, principalmente, por ter acreditado que eu conseguiria atingir os meus objetivos e alcançar esta vitória.

Agradeço aos Professores **Victor Roriz e Kelen Dornelles**, por toda disponibilidade e incentivo, para que este trabalho se concretizasse.

Agradeço à **FAPESP**, pelo apoio financeiro concedido, que foi de grande importância na realização desta pesquisa.

RESUMO

BRUGNERA, R. R. **Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com estratégias de ventilação híbrida.** 2014. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Grandes fachadas envidraçadas têm se tornado comuns em edifícios de escritórios, desconsiderando elementos importantes como as janelas na redução do seu consumo energético, por meio da obtenção da iluminação e ventilação naturais. Dessa forma, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar o potencial de economia de energia em edifícios de escritórios por meio da utilização de estratégias de ventilação híbrida, em duas regiões climáticas brasileiras distintas. O método consiste em medições com sensores para aferir dados de temperatura e umidade no momento em que são acionados os condicionadores de ar, a fim de obter a temperatura de *setpoint*. Tal resultado foi utilizado em simulações computacionais do desempenho térmico e da iluminação natural através dos programas *EnergyPlus* e *Daysim* respectivamente. Foi analisado um modelo de edifício de escritórios, com um sistema de iluminação eficiente (dimerizável) em que foram inseridas estratégias de ventilação híbrida, a fim de se obter a influência na economia de energia devido à redução do uso do condicionamento artificial de ar (nos períodos em que isso foi possível). Os resultados apresentaram uma redução no consumo do ar condicionado em torno dos 30%, enquanto que o impacto da ventilação híbrida no consumo de energia total do edifício apresentou-se na faixa dos 12%. Todavia, com a utilização de tais estratégias alcançou-se uma redução de até 84% do desconforto térmico nos ambientes. Como conclusão do trabalho tem-se que, utilizando-se um sistema de iluminação natural eficiente, o impacto da ventilação híbrida no potencial de economia de energia, dependendo do caso, pode não ser tão expressivo, ao passo que a redução no nível de desconforto térmico é bastante significativa.

Palavras-chave: ventilação híbrida, simulação computacional, eficiência energética.

ABSTRACT

BRUGNERA, R. R. **Potential of energy savings in office buildings with hybrid ventilation strategies.** 2014. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Large glazed facades have become common in office buildings and important elements, like windows to obtain natural lighting and ventilation to reduce their energy consumption have been ignored. This dissertation evaluates the potential of energy savings in office buildings through the use of hybrid ventilation strategies in two different Brazilian climatic regions. The method consists in measuring sensors for collecting humidity and temperature data at the time air conditioners are started so as to obtain the setpoint temperature. The results were used in computer simulations of both thermal performance and daylighting through EnergyPlus and Daysim software, respectively. A model of the office building, with efficient lighting (dimmable), was analyzed. Hybrid ventilation strategies were adopted for verifying the influence on energy savings due to a reduced use of artificial air conditioning (in periods in which it was possible). The results show a 30% reduction in the consumption of air conditioning and a 12% impact of hybrid ventilation on the total energy consumption of the building. However, such strategies caused an 84% reduction in the thermal discomfort in the environment. According to the results, the impact of hybrid ventilation on the potential energy savings by the use of efficient daylighting, in some cases, may not be so significant, whereas the reduction in the level of thermal discomfort is quite significant.

Keywords: hybrid ventilation, computer simulation, energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sala energeticamente eficiente.	7
Figura 2: Tipos de janelas e ângulos de abertura.....	11
Figura 3: Tipos de janelas e aberturas.....	11
Figura 4: Desenho da ventilação natural no edifício Renson.....	18
Figura 5: Desenho da ventilação natural no edifício Bang e Olufsen.	19
Figura 6: Desenho da ventilação natural no edifício Houghton Hall.	19
Figura 7: Modo de operação simultâneo.....	22
Figura 8: Modo de operação alternado.....	23
Figura 9: Modo de operação zoneado.	23
Figura 10: Planta pavimento tipo do edifício de escritórios.	30
Figura 11: A definição de Iluminância e Luminância.	32
Figura 12: Os tipos de céu.	33
Figura 13: Os ângulos solares.	34
Figura 14: O ofuscamento.....	35
Figura 15: Relação FLD e profundidade do ambiente.	36
Figura 16: Resumo das indicações na literatura internacional sobre o limite da profundidade do ambiente em relação à altura da verga da janela.	37
Figura 17: Influência da largura da sala, 15 de Março, céu claro, a partir da orientação da tarde, no sul.....	38
Figura 18: Desenho da fachada.....	38
Figura 19: Planta da sala e perspectiva com cotas.	39
Figura 20: Sistemas de controle de iluminação artificial.....	39
Figura 21: Sistemas de controle de venezianas.	40
Figura 22: Gráfico de ocupação versus horas do dia.....	40
Figura 23: Consumo energético de acordo com cada sistema de controle de venezianas (estático ou manual).....	41
Figura 24: Consumo de iluminação para usuários ativo e passivo.....	41
Figura 25: Sensor do tipo HOBO.	46
Figura 26: Médias horárias das temperaturas externas para o período de medições.	48
Figura 27: Sala 1 / Figura 28: Planta da Sala 1.....	48
Figura 29: Sala 2 / Figura 30: Planta da Sala 2.....	48
Figura 31: Foto da sala 3 / Figura 32: Planta da sala 3.....	49
Figura 33: Fotos da sala 4, sendo (A) fachada sudoeste e (B) fachada nordeste.	49
Figura 34: Planta da sala 4.	49

Figura 35: Médias horárias de temperaturas externas e internas na sala 1 (ventilador) nos quatro períodos de medição.....	50
Figura 36: Médias horárias de temperaturas externas e internas na sala 2 (ventilador) nos quatro períodos de medição.....	50
Figura 37: Médias horárias de temperaturas externas e internas na sala 3 (condicionador de ar) nos quatro períodos de medição.	51
Figura 38: Médias horárias de temperaturas externas e internas na sala 4 (condicionador de ar) nos quatro períodos de medição.	51
Figura 39: Histogramas demonstrando a frequência de ligar o ventilador em relação à temperatura nas salas 1 e 2.	52
Figura 40: Histograma demonstrando a frequência desligar o ventilador em relação à temperatura nas salas 1 e 2.	52
Figura 41: Histograma demonstrando a frequência de ligar o condicionador de ar em relação à temperatura nas salas 3 e 4.....	53
Figura 42: Histograma demonstrando a frequência de desligar o condicionador de ar em relação à temperatura nas salas 3 e 4.	53
Figura 43: Gráfico comparativo da faixa de neutralidade térmica prevista pela ASHRAE 55/2004 com as temperaturas de <i>setpoint</i> dos equipamentos nas quatro salas.	55
Figura 44: Variação da temperatura ao longo do ano para a cidade de São Carlos (SP). ...	56
Figura 45: Rosa dos ventos para a cidade de São Carlos (SP).	57
Figura 46: Diagrama bioclimático de Givoni para a cidade de São Carlos (SP).	57
Figura 47: Variação da temperatura ao longo do ano para a cidade de Natal (RN).	58
Figura 48: Rosa dos ventos para a cidade de Natal (RN).	59
Figura 49: Diagrama bioclimático de Givoni para a cidade de Natal (RN).	60
Figura 50: Representação esquemática das condições necessárias à obtenção de conforto térmico.....	61
Figura 51: Intervalo de temperatura operativa aceitável para espaços condicionados naturalmente.....	62
Figura 52: Modelo adotado por (a) Reinhart e Wienold (2011); (b) Ghisi (2002) e Rupp (2011).	66
Figura 53: Modelo a ser simulado.....	67
Figura 54: Dimensões das aberturas.	68
Figura 55: Porcentagem de área de cada cor na fachada.	68
Figura 56: Distribuição da malha de pontos.	71
Figura 57: Consumo anual de iluminação artificial nos módulos (PAF=50%) para São Carlos (SP).	80
Figura 58: Consumo anual de iluminação artificial nos módulos (PAF=50%) para Natal (RN).	81
Figura 59: Consumo de iluminação artificial no módulo 2 (PAF=50%) para São Carlos (SP).	82

Figura 60: Consumo de iluminação artificial no módulo 2 (PAF=50%) para Natal (RN).....	82
Figura 61: Consumo anual de iluminação artificial nos módulos (PAF=30%) para São Carlos (SP).	83
Figura 62: Consumo anual de ar condicionado nos módulos (PAF=50%) para São Carlos (SP).	84
Figura 63: Consumo anual de ar condicionado nos módulos (PAF=50%) para Natal (RN).	85
Figura 64: Consumo do ar condicionado no módulo 1 (PAF=50%) para São Carlos (SP).	86
Figura 65: Consumo do ar condicionado na sala norte (módulo 1) dia 22/02 em São Carlos.	86
Figura 66: Consumo do ar condicionado na sala norte (módulo 1) dia 19/07 em São Carlos.	87
Figura 67: Consumo do ar condicionado no módulo 1 (PAF=50%) para Natal (RN).....	87
Figura 68: Consumo do ar condicionado nos módulos (PAF=30%) para São Carlos (SP).	88
Figura 69: Graus-Hora de desconforto no módulo 1 (PAF=50%) em São Carlos (SP).	93
Figura 70: Graus-Hora de desconforto no módulo 1 (PAF=50%) em Natal (RN).....	93
Figura 71: Graus-Hora de desconforto no módulo 1 (PAF=30%) em São Carlos (SP).	94
Figura 72: Variação da Temperatura ao longo de um dia-exemplo de verão (20/02) com ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).....	95
Figura 73: Renovações de ar por hora ao longo de um dia-exemplo de verão (20/02) com ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).....	96
Figura 74: Variação da Temperatura ao longo de um dia-exemplo de inverno (19/07) com ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).....	97
Figura 75: Renovações de ar por hora ao longo de um dia-exemplo de inverno (19/07) com ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).....	97
Figura 76: Variação da Temperatura ao longo do dia 20/02 com ventilação híbrida em Natal (PAF=50%)	99
Figura 77: Variação da Temperatura ao longo do dia 19/07 com ventilação híbrida em Natal (PAF=50%)	100
Figura 78: Consumo anual com ar condicionado no modelo de ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).....	100
Figura 79: Consumo anual com ar condicionado no modelo de ventilação híbrida em São Carlos (PAF=30%).....	101
Figura 80: Consumo anual com ar condicionado no módulo 1 de ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).....	102
Figura 81: Consumo anual com ar condicionado no módulo 1 de ventilação híbrida em São Carlos (PAF=30%).....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características recomendáveis dos edifícios com ventilação natural, ar condicionado e modo misto.....	25
Quadro 2: Caracterização do edifício Racz Center	64
Quadro 3: Caracterização do modelo simplificado do edifício Racz Center.....	65
Quadro 4: Dados de entrada (inputs)	69
Quadro 5: Orientações simuladas para cada cidade.	69
Quadro 6: Parâmetros a serem definidos para as análises de iluminação natural	72
Quadro 7: Características das lâmpadas e luminárias.	73
Quadro 8: Parâmetros da modelagem da ventilação natural.	74
Quadro 9: Parâmetros de modelagem do termostato.	75
Quadro 10: Parâmetros de modelagem do sistema.....	76
Quadro 11: Parâmetros de modelagem do sistema.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores horários do fator Kth, correspondentes a um dia climático médio	47
Tabela 2: Temperatura mensal ao longo do ano para a cidade de São Carlos (SP)	56
Tabela 3: Dados mensais e estratégias para a cidade de São Carlos (SP)	58
Tabela 4: Temperatura mensal ao longo do ano para a cidade de Natal (RN)	59
Tabela 5: Dados mensais e estratégias para a cidade de Natal (RN)	60
Tabela 6: Resumo das dimensões do modelo a ser simulado.....	68
Tabela 7: Quantidade mínima de pontos a serem medidos.....	71
Tabela 8: Coeficientes de descarga e expoentes do fluxo de ar das aberturas quando estão fechadas.....	74
Tabela 9: Parâmetros de detalhamento das aberturas.....	75
Tabela 10: Comparação de consumo anual com iluminação artificial para São Carlos.	83
Tabela 11: Comparação de consumo anual com ar condicionado para São Carlos.	88
Tabela 12: Consumo total anual nos módulos AC para São Carlos (PAF=50%).	89
Tabela 13: Consumo total anual nos módulos AC para Natal (PAF=50%).....	90
Tabela 14: Consumo total anual nos módulos AC para São Carlos (PAF=30%).	90
Tabela 15: Faixas de Temperatura de Conforto para São Carlos e Natal.....	91
Tabela 16: Graus-Hora de desconforto anual em cada módulo para São Carlos (PAF=50%).	91
Tabela 17: Graus-Hora de desconforto anual em cada módulo para Natal (PAF=50%).	92
Tabela 18: Graus-Hora de desconforto anual em cada módulo para São Carlos (PAF=30%).	92
Tabela 19: Consumo do ar condicionado quando utilizado em conjunto com a ventilação natural (ventilação híbrida) em Natal.....	98
Tabela 20: Porcentagem de horas ocupadas que a janela ficou aberta em São Carlos e Natal.	99
Tabela 21: Consumo do ar condicionado quando utilizado em conjunto com a ventilação natural (ventilação híbrida) em São Carlos.	103
Tabela 22: Consumo do ar condicionado quando utilizado em conjunto com a ventilação natural (ventilação híbrida) em São Carlos.	103
Tabela 23: Comparação da porcentagem de horas ocupadas em desconforto para São Carlos (PAF=50%).....	104
Tabela 24: Comparação da porcentagem de horas ocupadas em desconforto para São Carlos (PAF=30%).....	105
Tabela 25: Consumo total anual para São Carlos (VH / PAF=50%)	105
Tabela 26: Consumo total anual para Natal (VH / PAF=30%).....	106
Tabela 27: Consumo total anual para São Carlos (VH / PAF=30%)	106
Tabela 28: Comparação do consumo total anual para São Carlos (AC / VH / PAF=50%)	107

Tabela 29: Comparação do consumo total anual para Natal (AC/ VH / PAF=50%) 107
Tabela 30: Comparação do consumo total anual para São Carlos (AC / VH / PAF=30%) 108

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	47
Equação 2.....	63
Equação 3.....	71

LISTA DE SIGLAS

AC: Ar Condicionado

°Ch: Graus-hora

CP: Coeficiente de Pressão

DPI: Densidade de Potência em Iluminação

EP: *EnergyPlus*

EPW: *EnergyPlus Weather File*

HVAC: Heating, Ventilating, and Air Conditioning

IAQ: Índice de Qualidade do Ar

MM: Modo misto

NV: Naturalmente Ventilados

PAF: Porcentagem de Abertura na Fachada

Ren/h: Renovações de Ar por Hora

VH: Ventilação Híbrida

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

BEN: Balanço Energético Nacional

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

NBR: Norma Brasileira

RTQ: Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo Geral.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.2. Estrutura da dissertação.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Os Edifícios de Escritórios	8
2.3. A Ventilação Natural e Híbrida	10
2.4. A Iluminação Natural	31
3. METODOLOGIA.....	43
3.1. Medições Realizadas nas Salas do IAU	43
3.2. Caracterização dos Climas a serem estudados	43
3.3. Simulação Computacional.....	44
3.4. Procedimento experimental.....	46
3.4.1. Medições salas IAU.....	46
3.4.2. Temperatura Externa.....	47
3.4.3. Salas analisadas pelo estudo.....	48
3.4.4. Comparação das Temperaturas internas e externas	50
3.4.5. Análise das Temperaturas de <i>setpoint</i>	52
3.4.6. Análise comparativa das temperaturas de <i>setpoint</i> com a ASHRAE 55/2004	54
3.4.7. Análise dos resultados.....	55
3.5. Caracterização dos climas	55
3.5.1. São Carlos (SP)	56
3.5.2. Natal (RN)	58
3.6. Definição do Índice de Conforto Térmico	61
3.7. A escolha do modelo do edifício	63
3.7.1. Preparação do modelo para as simulações.....	66
3.7.2. Modelagem para Simulação da Iluminação Natural	70

3.7.3. Modelagem para Simulação da Ventilação Natural	73
3.7.4. Modelagem do Sistema de Condicionamento de ar.....	75
3.7.5. Modelagem da Ventilação Híbrida	76
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
4.1. Desempenho energético dos módulos com Ar Condicionado.....	79
4.1.1. Análise do desempenho geral.....	79
4.1.2. Análise do consumo total.....	89
4.2. Desempenho térmico do módulo com Ventilação Natural.....	90
4.3. Desempenho energético dos módulos com Ventilação Híbrida	95
4.3.1. Análise do desempenho geral.....	95
4.3.2. Análise do consumo total.....	105
4.4. Potencial de economia de energia	106
5. CONCLUSÕES.....	109
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	113
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia vem crescendo exponencialmente na sociedade moderna. Em 2003 o consumo diário de energia foi estimado em 46.300kcal/habitante, correspondendo a uma quantidade 23 vezes maior à necessária para a sobrevivência biológica (2000kcal/dia), sendo o consumo apresentado pelas regiões mais desenvolvidas muito superior às demais (AGOPYAN e JOHN, 2011).

O relatório do Balanço Energético Nacional (BEN, 2012), indica que houve um crescimento anual de 3.3% no consumo de energia elétrica, enquanto que a oferta interna de energia elétrica cresceu apenas 3.1%. Em relação ao consumo final de energia por fonte, a eletricidade situa-se em segundo lugar, ficando apenas atrás do óleo diesel. Tais dados demonstram que o consumo de energia tende a aumentar, enquanto que a oferta por energia pode não acompanhar a mesma evolução, o que mostra a importância deste tema na atualidade.

Tal situação acaba, assim, afetando toda a matriz energética do país, que tem que produzir mais energia para suprir a demanda que aumenta a cada dia. Com o surgimento de novos equipamentos eletrônicos e o aumento no consumo dos aparelhos condicionadores de ar, os edifícios acabam exigindo cada vez mais energia para o seu funcionamento.

Grande parte desse consumo advém dos edifícios de escritórios, os quais apresentam, devido aos padrões comerciais e de ocupação, uma tipologia geralmente caracterizada por alta geração de carga térmica interna e elevada demanda energética, de maneira que o clima externo, o projeto arquitetônico e as condições aceitáveis de conforto térmico são alguns dos principais parâmetros que influenciam o desempenho térmico e a eficiência energética dos edifícios de escritórios (MARCONDES et al, 2011).

Na década de 1980, o surgimento dos computadores e outros equipamentos fez com que os ganhos de calor internos dos escritórios aumentasse, ao mesmo tempo em que as fachadas envidraçadas, muitas vezes pouco sombreadas, acabaram se tornando um elemento comum nessa tipologia. Juntando isto aos ganhos de calor pela iluminação elétrica excessiva, o risco de superaquecimento também aumentou, fazendo com que o uso do ar condicionado fosse ampliado de forma considerável (GRATIA e HERDE, 2003).

O conforto ambiental apresenta-se como um elemento de grande influência no bem-estar do ser humano, pois engloba vários aspectos (térmicos, ergonômicos, visuais, acústicos, entre outros), que agem diretamente no dia-a-dia das pessoas. Dessa forma, os ambientes devem ser projetados de maneira a criar espaços confortáveis e funcionais, facilitando assim a vida das pessoas.

Uma boa estratégia de projeto, que pode fornecer condições de conforto térmico apropriadas aos ocupantes de maneira eficiente energeticamente, é a ventilação natural (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2005; ETHERIDGE e FORD, 2008; YAO et al, 2009 apud MARCONDES

et al, 2011), a qual pode promover o resfriamento passivo dos ambientes internos dos edifícios, fornecendo taxas mínimas de renovação do ar e atendendo à requisitos de salubridade. Tal estratégia também é benéfica para os edifícios de escritórios, uma vez que pode reduzir o consumo excessivo de energia elétrica, já que o uso do ar condicionado seria minimizado.

Dessa forma, diversos estudos internacionais estão sendo desenvolvidos para pesquisar a utilização da ventilação natural em edifícios de escritórios, como estratégia para diminuir o consumo excessivo de energia elétrica das edificações (ARNOLD, 1996; GHIAUS, 2003; GRATIA e HERDE, 2003, 2007; RIJAL et al, 2007; ETHERIDGE e FORD, 2008; YAO et al, 2009, apud MARCONDES et al, 2011).

Tendo em vista a importância de se aproveitar melhor os recursos naturais existentes, como a ventilação e a iluminação natural em prol de se reduzir o consumo de energia dos edifícios, buscar estratégias passivas de conforto térmico pode ser uma alternativa aos edifícios naturalmente ventilados [NV] com usuários controlando janelas. “Modo misto” [MM] de ventilação representa uma maneira de combinar as melhores características dos edifícios NV e AC (com ar condicionado) (DEUBLE e DE DEAR, 2012).

Edifícios híbridos ou de “Modo misto”¹ referem-se a uma abordagem do espaço condicionado que utiliza uma combinação de ventilação natural (janelas operáveis manualmente ou automaticamente controladas) e sistemas mecânicos que abrangem equipamentos de refrigeração e de distribuição de ar para resfriamento. Dessa forma, segundo Figueiredo (2007), seria possível utilizar uma tecnologia passiva (ventilação natural) e ainda manter o conforto térmico nos ambientes durante os períodos em que esta não fosse suficiente, a partir do uso complementar dos aparelhos condicionadores de ar.

Quando a ventilação natural não for suficiente, os sistemas mecânicos são acionados de maneira suplementar, gerando uma solução aceitável, que pode permitir ao edifício capturar os benefícios da ventilação natural de modo seguro e manter o nível de conforto térmico interno durante condições externas extremas. A ventilação híbrida, dessa forma, pode ser aplicada a vários climas em que somente a ventilação natural não seja suficiente para refrigerar o ambiente (ZHAI et al, 2011).

É preciso salientar que a iluminação natural também se apresenta como um aspecto importante no provimento do conforto térmico, uma vez que pela janela se recebe tanto a ventilação quanto a iluminação, sendo estes recursos complementares. Dessa forma, em edifícios de escritórios, a ventilação e a iluminação natural, quando utilizadas de forma eficiente, geralmente são elementos que se complementam no combate ao consumo

¹ Center for the Built Environment (CBE). University of California, Berkeley. <<http://www.cbe.berkeley.edu/mixedmode/aboutmm.html>>. Acesso em 20 jun. 2012.

excessivo de energia, uma vez que podem contribuir para a redução do uso do ar condicionado.

Nessa tipologia, o uso de planos de vidro nas fachadas normalmente é o único meio de captação da luz natural, fazendo com que haja uma série de implicações negativas, como contraste² e superaquecimento. Para que esses problemas sejam amenizados, é frequente o uso de persianas e cortinas, as quais não permitem a entrada de luz natural, ao mesmo tempo em que não resolvem o superaquecimento nos locais próximos às fachadas (VIANNA e GONÇALVES, 2001).

A qualidade da luz natural incidente em espaços de escritórios, assim como nas escolas, é muito importante, uma vez que nesses locais são desenvolvidas atividades visuais como leitura e escrita. A iluminação natural, quando utilizada de maneira adequada pode promover o conforto psicológico e tornar o ambiente interno mais agradável, gerando melhores condições de saúde, ao passo que pode influenciar o ciclo biológico das pessoas (MARTAU, 2009; FIGUEIRÓ, 2010 apud ALBUQUERQUE e AMORIM, 2012).

O aproveitamento da luz natural tem uma importante dimensão do ponto de vista ambiental, funcional e qualitativo da arquitetura. Inúmeras variáveis da edificação influenciam no comportamento da luz natural, tais como a dimensão e forma dos ambientes (largura, profundidade e altura), área e forma das aberturas, refletâncias internas (paredes, teto e piso), além do uso de proteções solares e elementos para distribuição da luz natural.

O Brasil destaca-se por sua localização e imensa costa oceânica³, possuindo muita disponibilidade de luz natural que pode ser utilizada de forma mais eficaz nos projetos arquitetônicos, a fim de otimizar tanto o uso da iluminação artificial quanto o uso do ar condicionado.

De acordo com Vianna e Gonçalves (2001), o uso conjunto da iluminação natural com a artificial em edifícios não-residenciais pode atingir, mediante a eficiência do sistema e a especificação de suas instalações, economias de energia na ordem de 30 a 70%. Projetos que priorizem o aproveitamento da luz natural podem atingir níveis de iluminância internos na faixa de 80 a 90% das horas diurnas do ano, o que pode possibilitar reduções no consumo de energia elétrica advindos do sistema de iluminação artificial (devido à diminuição do período de utilização e/ou intensidade energética).

Outra questão a ser considerada é o comportamento dos usuários, ou seja, a forma como utilizam os sistemas. De acordo com Rocha e Pereira (2011), os sistemas podem ser

² Em sentido perceptivo, é a avaliação da diferença de aspecto de duas ou mais partes do campo observado, justapostos no espaço ou no tempo. Em sentido psicofísico, é uma grandeza associada à diferença de luminosidade percebida (ABNT, 1991).

³ A influência de grandes massas de água, como em regiões da costa oceânica ou contornos de lagoas urbanas, o extenso espelho d'água tem a capacidade de refletir proporcionalmente mais luz quando o Sol encontra-se em baixos ângulos de altitude. Dessa maneira, o potencial do componente luz refletida é maximizado no total da quantidade de luz natural (VIANNA e GONÇALVES, 2001).

utilizados de duas formas: ativa ou passiva. Por exemplo, o usuário ativo é aquele que aciona a iluminação artificial de acordo com as condições de iluminação natural do ambiente (apenas se for necessário), ao passo que o usuário passivo desconsidera qualquer tipo de condicionamento natural e utiliza apenas a iluminação artificial durante o dia todo. Tais comportamentos podem, respectivamente, potencializar ou reduzir a economia de energia por conta do aproveitamento da luz natural.

Dessa forma, a presente pesquisa irá se focar exclusivamente em edifícios de escritórios, uma vez que estes têm grande importância do ponto de vista energético, devido ao seu formato, implantação, tempo de ocupação por parte dos usuários, entre outros aspectos. Como contribuição ao estudo da eficiência energética de edifícios de escritórios com estratégias de ventilação híbrida, o presente estudo pretende analisar por meio da simulação computacional o potencial de economia de energia, visando à utilização dos recursos naturais disponíveis, tais como a ventilação e a iluminação natural em prol da redução do consumo de energia.

1.1. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o potencial de economia de energia em edifícios de escritórios por meio da utilização de estratégias de ventilação híbrida, em duas regiões climáticas brasileiras distintas.

1.2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Avaliar, por meio de medições *in loco*, a que temperaturas são acionados os aparelhos condicionadores de ar nesse tipo de edifício;
- Avaliar o consumo de energia devido à iluminação artificial nesses edifícios de escritórios de forma eficiente, sendo ela complementar à iluminação natural, ocorrendo somente quando esta for insuficiente;
- Avaliar o conforto térmico nos edifícios de escritórios analisados, nos períodos em que há ventilação natural e híbrida;
- Avaliar o consumo de energia total desses edifícios, nos módulos com ar condicionado e com ventilação híbrida.

1.2. Estrutura da dissertação

O presente trabalho é estruturada em **7 capítulos**, sendo que o **primeiro** apresenta uma parte introdutória, com justificativa e objetivos da pesquisa. O **segundo** capítulo expõe a revisão bibliográfica sobre temas como edifícios de escritórios, ventilação natural e híbrida e iluminação natural. No **terceiro** capítulo é descrita a metodologia de trabalho, apresentando um estudo experimental feito como complemento à pesquisa; a caracterização dos climas a serem estudados, a descrição dos programas de simulação computacional, o índice de conforto térmico e a definição do modelo de edifício a ser estudado. O **quarto** capítulo apresenta os resultados das simulações e discussões. O **quinto** capítulo expõe as conclusões. No **sexto** são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros e no **sétimo**, as referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item será apresentada uma breve introdução com os principais tópicos da revisão bibliográfica, seguida pela revisão sobre edifícios de escritórios, ventilação natural e híbrida e iluminação natural.

2.1. Introdução

Segundo Pereira et al (2005), a utilização de tecnologias mais eficientes e o uso de estratégias passivas de energia podem gerar bons projetos, uma vez que a ventilação e a iluminação natural apresentam formas de garantir bons níveis de conforto térmico nos ambientes, mantendo a produtividade dos usuários, conforme apresentado na figura 1.

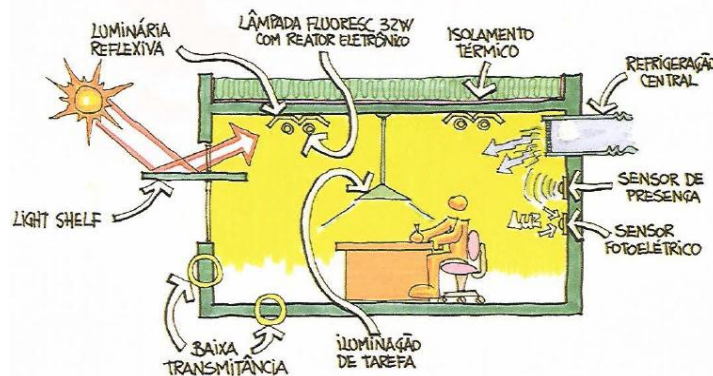


Figura 1: Sala energeticamente eficiente.
Fonte: LAMBERTS, 1997.

A preocupação com a eficiência energética das edificações e a consequente adequação da arquitetura ao clima têm sido bastante discutidas nos últimos anos, e dentre os recursos bioclimáticos⁴ adotados destacam-se a ventilação e a iluminação natural como formas de se obter o conforto térmico no clima quente e úmido, de maneira que podem colaborar para a redução do uso do condicionamento artificial de ar (TRINDADE et al, 2010).

Dessa forma, nos edifícios de escritórios, geralmente caracterizados pelas fachadas envidraçadas e elevada carga térmica interna, a utilização de tais recursos mostra-se como uma alternativa na redução do consumo de energia elétrica e melhoria nos aspectos de conforto térmico.

Tendo em vista tais questões, é importante salientar que as decisões tomadas durante a concepção dos projetos podem ter um grande impacto no desempenho do edifício

⁴ Na arquitetura bioclimática é o próprio ambiente construído que atua como mecanismo de controle das variáveis do meio através de sua envoltura (paredes, pisos, coberturas), seu entorno (água, vegetação, sombras, terra) e, ainda, através do aproveitamento dos elementos e fatores do clima para melhor controle do vento e do sol (ROMERO, 1988).

construído, como por exemplo, a profundidade, a altura das salas e a dimensão das janelas podem dobrar o consumo de energia elétrica, podendo também diminuir os níveis de luz do dia e aumentar as temperaturas do verão, podendo afetar a produtividade dos usuários (GRATIA e HERDE, 2003).

Ao se projetar é necessário avaliar as condições de orientação, bem como a localização e o entorno, pois pequenos erros podem gerar grandes prejuízos no futuro, e para que tais erros de projeto sejam concertados demandam soluções que muitas das vezes são inviáveis.

Assim, a presente pesquisa trabalha com três elementos básicos: 1) edifício de escritórios; 2) ventilação natural e 3) iluminação natural. Esses três elementos são de extrema importância quando relacionados ao consumo de energia elétrica, principal foco da pesquisa.

Inicialmente, trabalhando-se com os edifícios de escritórios, tem-se uma questão de projeto, em que a tipologia é predominada pelo desenho da fachada, geralmente composta por grandes aberturas envidraçadas. Tal característica influencia diretamente no desempenho do edifício em relação à ventilação e iluminação natural, uma vez que a janela é o principal meio que envolve esses dois elementos.

Considerando a ventilação natural, por meio da inserção das estratégias híbridas, em que o ar condicionado funcione apenas como um complemento à ventilação natural, quando esta não for suficiente para resfriar o ambiente, é possível verificar a sua influência direta no consumo de energia do ar condicionado, que tende a ser minimizado.

A iluminação natural também deve ser considerada, conforme fora supracitado, trabalhando assim com a ideia de um sistema eficiente, em que a iluminação artificial funcione como um complemento à natural, nos momentos em que esta não for suficiente. Tal conceito pode causar reduções no consumo com iluminação artificial, contribuindo assim para a redução no consumo excessivo de energia elétrica do edifício.

Dessa forma, trabalhando com tais elementos de forma conjunta, é possível avaliar o potencial de economia de energia no edifício de escritórios, tendo como base para isso as estratégias de ventilação híbrida.

2.2. Os Edifícios de Escritórios

Os edifícios de escritórios, de acordo com Vianna e Gonçalves (2001), geralmente são grandes volumes compactos, fazendo com que o volume interior predomine sobre a área de fachada. E, de acordo com Gratia et al (2004), há uma crescente demanda em se projetar edifícios de escritórios de alta qualidade, nos quais usuários e projetistas buscam desenvolver para esses edifícios ambientes de trabalho saudáveis e estimulantes.

Na tentativa de se desenvolver ambientes mais confortáveis, o sistema de condicionamento de ar pode ser um elemento importante, no sentido de proporcionar um clima interno mais agradável aos usuários. No entanto, tal elemento muitas vezes é inserido no ambiente interno sem avaliação prévia, gerando alto gasto energético que poderia ser reduzido com a inserção da ventilação natural, a qual poderia ser suficiente em alguns momentos e assegurar bons níveis de conforto térmico.

No entanto, ao mesmo tempo em que a ventilação natural apresenta-se como uma opção simples para promover o resfriamento dos ambientes, ela também é um elemento difícil de ser controlado. Assim, para funcionar corretamente, a ventilação natural deve ser planejada, pois, de acordo com Gratia et al (2004), a sua importância deve ser reconhecida nas fases iniciais do processo de projeto, antes de tomar decisões que possam torná-la impraticável, uma vez que são decisões difíceis de mudar quando o edifício é construído.

Segundo Vianna e Gonçalves (2001), nessa tipologia de edifício é comum o uso de planos de vidro nas fachadas como único meio de captação da luz natural, o que pode gerar implicações negativas, tais como contraste e superaquecimento. Como forma de amenizar tais problemas, o uso de persianas e cortinas é frequente, no entanto estas não permitem a entrada de luz natural e não reduzem o superaquecimento nos locais próximos às fachadas.

De acordo com os autores, as formas que fornecem maior aproveitamento da iluminação natural são as lineares e as radiais, além da utilização de recursos para melhorar a qualidade do ambiente luminoso, tais como átrios e dutos de luz. O sistema de abertura zenital normalmente não é utilizado, a menos que esteja atrelado ao desenho de átrios, comuns em edifícios de multipavimentos.

A presença de iluminação natural é um conceito importante a ser considerado em edifícios de escritórios, uma vez que no Brasil, principalmente, se tem grande disponibilidade de luz natural e esses locais são ambientes que necessitam de iluminação por conta das atividades desenvolvidas, como a leitura e a escrita, além de serem utilizados preferencialmente durante todo o dia.

Como nem sempre grandes planos de vidro resolvem a questão da entrada de luz (por conta do ofuscamento e superaquecimento), o ideal seria se utilizar um sistema eficiente, em que os dispositivos de captação da iluminação natural funcionassem em conjunto com a iluminação artificial (por meio de sensores e *dimmers*), pois assim poderia se alcançar um equilíbrio, onde o uso exagerado de ambas as partes não ocorresse.

Dessa forma, no projeto de edifícios de escritórios, é importante considerar o desenho da fachada, posto que é por ela que se irá obter a ventilação e a iluminação natural, elementos fundamentais que, quando dimensionados corretamente, podem gerar grandes economias de energia elétrica para o edifício.

2.3. A Ventilação Natural e Híbrida

Ventilar um local adequadamente, isto é, fornecer e retirar o ar do ambiente pode satisfazer as exigências de qualidade, segurança, manutenção da saúde e do bem-estar das pessoas. E tais benefícios referem-se ao conforto térmico e a qualquer incômodo que o movimento do ar possa causar no ambiente (RUAS e LABAKI, 2001).

Segundo Gratia et al (2004), é possível classificar a ventilação em dois tipos, a saber: "ventilação higiênica" e "ventilação para resfriamento". A primeira proporciona um ambiente limpo, saudável e confortável num edifício para as pessoas que o utilizam e trabalham lá, enquanto que a segunda tem por objetivo principal resfriar o edifício, sendo a ventilação que ocorre quando o prédio não está ocupado (por exemplo, a ventilação noturna), bem como durante as horas de ocupação. A ventilação apenas é caracterizada como "natural" quando não tiver o consumo de energia para gerá-la.

As variáveis ambientais que definem a necessidade ou não de se permitir a ventilação natural são a velocidade, a temperatura e a umidade do ar, por estarem diretamente associadas ao conforto térmico, ao mesmo tempo que as preferências térmicas e os hábitos dos usuários também devem ser considerados (TOLEDO, 2006). De modo que o movimento do ar geralmente é desejável, desde que em baixas velocidades, em toda zona de conforto e acima dela (com umidade relativa do ar entre 80 e 100%), para garantir a qualidade do ar e facilitar a evaporação da transpiração pela pele. Em locais com alta umidade, é adequado se indicar a ventilação natural para evitar principalmente a proliferação de fungos e condensações indesejáveis (HERTZ, 1998 apud TOLEDO, 2006).

Dessa forma, para temperaturas do ar inferiores às temperaturas da zona de conforto, o incremento do movimento do ar poderá causar desconforto térmico pela sensação de frio, ao passo que para temperaturas do ar superiores à temperatura da pele, esse incremento poderá ampliar o desconforto térmico pela sensação de calor. Nessas condições, a ventilação natural para conforto térmico é indesejável (TOLEDO, 2006). Assim, para ser bem sucedida, a ventilação deve ser planejada e não "por acaso" (GRATIA et al, 2004).

O desenho da fachada desempenha um papel importante no projeto das edificações, uma vez que as aberturas e o controle das mesmas exercem influência direta na eficácia da ventilação natural. Dessa forma, a escolha do tipo de janela e o posicionamento das aberturas na fachada podem promover uma boa ventilação, proporcionando assim um maior conforto térmico no ambiente.

A relação estabelecida entre a ventilação natural e o projeto arquitetônico se dá, basicamente, pela janela. Existe uma grande variedade de tipos de janela e de abertura disponíveis, conforme apresentado na figura 2, de forma que tipos diferentes de abertura de janela possuem propriedades diferentes em relação à proteção ao clima, às taxas de ventilação, e às possíveis interferências com o mobiliário, por exemplo. A escolha sobre qual

janela será aplicada em um edifício de escritórios é uma decisão arquitetônica diretamente relacionada ao clima (ROETZEL et al, 2010).

Table 1
Evaluation of different window opening types regarding properties affecting the effectiveness of ventilation in offices for typical opening angles. Description of symbols: -, poor; 0, medium; +, good.

Properties of different window types when opened at a typical angle	Side hung, opening to inside	Bottom hung, opening to inside	Sliding, opened pane always covers part of window	Horizontal pivoted, lower part opening to outside	Top hung, opening to outside
Weather protection	-	+	-	0	0
Max. achievable ventilation rate	+	-	0	+	0
Adjustability of opening size	+	-	+	+	+
Flexibility for placement of furniture	-	+	+	0	+

Figura 2: Tipos de janelas e ângulos de abertura.

Fonte: ROETZEL et al, 2010.

A correta distribuição de aberturas numa fachada pode não só aumentar a flexibilidade na utilização da mesma, com também aumentar as taxas de renovação de ar. E isso não é apenas uma questão de desenho de fachada, mas são possibilidades de se aumentar o controle das aberturas por meio dos usuários, gerando assim uma ventilação mais eficaz (ROETZEL et al, 2010). Alguns tipos de janelas e ângulos de abertura são apresentados na figura 3.

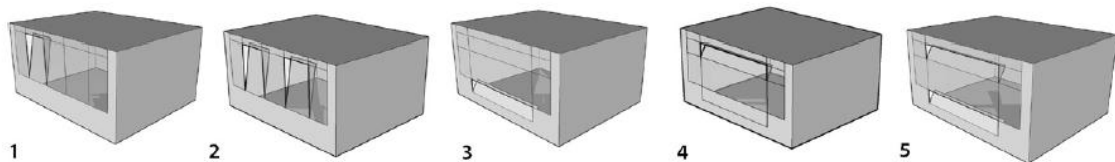


Figura 3: Tipos de janelas e aberturas.

Fonte: ROETZEL et al, 2010.

De acordo com Rijal et al (2007), as janelas são um dos principais meios pelos quais os ocupantes dos edifícios podem controlar o ambiente interno. De acordo com o princípio adaptativo para o conforto térmico humano, se ocorrer uma alteração de modo a produzir desconforto, as pessoas reagem de forma a restaurar o seu conforto, o que significa que se as pessoas se sentirem desconfortáveis elas tenderão a agir para melhorar o seu conforto. E tal ação pode ser realizada por meio da utilização dos controles do edifício, de maneira que se a ação for bem-sucedida eles irão reduzir ou evitar o desconforto.

Um dispositivo de controle térmico mais comum em qualquer edifício é a janela, pois se as pessoas sentirem calor e quiserem se refrescar dentro de casa, elas geralmente abrem a janela para resfriar o ambiente interno, ao passo que se elas sentirem muito frio e a janela estiver aberta elas irão fechá-la. Este comportamento de abertura da janela pode não ser útil

apenas para poupar energia no verão, reduzindo a necessidade de resfriamento ou de aquecimento mecânico, mas também para que os ambientes interno e externo interajam de maneira positiva (RIJAL et al , 2007).

Na pesquisa de Roetzel et al (2010), foram feitos estudos de campo em diferentes países e climas, exclusivamente em edifícios de escritórios. Os tipos de janelas e desenhos de fachada foram observados durante períodos diversos (inverno, verão, curto prazo, longo prazo). Dentro de tais comparações algumas questões foram comuns e geraram parâmetros que influenciam na ventilação controlada pelo usuário, tais como: a) estações do ano, b) temperatura, c) hora do dia; d) estado de abertura da janela; e) ventilação noturna.

Em relação às estações do ano, Roetzel et al (2010) afirmam que há uma forte relação entre o estado de abertura das janelas e a estação do ano, pois a maior frequência em mudar o estado de abertura da janela foi observada na primavera e no outono, e uma baixa frequência no verão, porque as janelas ficam abertas por períodos mais longos, na tentativa de se resfriar o ambiente interno.

De acordo com Yun et al (2009), conforme as pessoas chegam ao ambiente de trabalho e notam que a temperatura interna está mais elevada que a externa (tornando o ambiente mais abafado), a frequência de abertura das janelas aumenta. Ao se chegar a uma sala e a temperatura estiver alta, o ato de se abrir as janelas é algo quase imediato, para diminuir a sensação de abafamento sentido no ambiente. No entanto, se a janela estiver um pouco aberta e, portanto, houver a renovação daquele ar (durante a noite, por exemplo), a frequência de abertura das janelas será menor.

Já em relação à hora do dia, as primeiras ações de controle de janelas ocorrem geralmente durante a chegada dos usuários no escritório. Durante o dia, as ações de controle sobre as janelas são relativamente baixas, de modo que elas permanecem na mesma posição por longos períodos de tempo. Segundo Roetzel et al (2010), este efeito pode ser parcialmente explicado pelo fato de que os ocupantes possam ter se adaptado à qualidade do ar interior na sala durante este período e os efeitos positivos da abertura de uma janela não são fortemente percebidos como no período da manhã.

Outro parâmetro avaliado nesse estudo de Roetzel et al (2010) e que influencia o comportamento de abertura das janelas é o *status* prévio à abertura. Isso foi considerado principalmente no contexto de ventilação noturna. Se a ventilação noturna não é possível, o *status* da janela antes da chegada dos ocupantes na parte da manhã é "fechado". Isto significa que no verão, durante a noite, a temperatura ambiente pode ter aumentado e a qualidade do ar interior diminuída. Ambos os efeitos podem fazer com que os usuários abram a janela no início do dia.

Já a ventilação noturna, parâmetro que pode contribuir de forma positiva no resfriamento dos ambientes internos dos edifícios, é uma questão polêmica, principalmente em relação à segurança, uma vez que as janelas ficam abertas durante a noite toda e isso

pode gerar, em alguns casos, perigo. Para que essa estratégia possa ser utilizada é necessário que haja um desenho na fachada do edifício de maneira que não a deixe totalmente exposta, mas que possa gerar apenas a renovação de ar no ambiente interno.

De acordo com Roetzel et al (2010), o controle da ventilação natural pelos usuários depende de uma variedade de influências, tais como: o tipo de abertura da janela, o tamanho da janela, forma e colocação, a acessibilidade às janelas (colocação de móveis) e a relação hierárquica dos usuários em caso de controle compartilhado sobre as janelas.

O detalhamento da geometria das aberturas de janela influencia significativamente na renovação do fluxo de ar dos ambientes e pode ser simulado ainda na fase de projeto, por meio de ferramentas com o CFD⁵, por exemplo. A simulação computacional surge então como um meio de se evitar erros, uma vez que se estimam parâmetros e valores de utilização dos espaços, podendo então perceber onde estão as falhas.

Dessa forma, a simulação computacional tem se tornado uma ferramenta viável de auxílio ao projeto, mas acessível apenas a grupos de pesquisa, pois ainda que os programas de simulação da ventilação natural tenham se tornado acessíveis para a pesquisa científica, o seu uso por parte do arquiteto ainda é questionável, mesmo sendo este profissional o responsável pelas decisões mais influentes sobre o desempenho da ventilação na arquitetura (TRINDADE et al, 2010).

No entanto, podem haver diferenças no desempenho energético e de conforto térmico nos edifícios entre o que foi calculado teoricamente para as simulações e o que foi medido experimentalmente, uma vez que os cálculos geralmente são baseados em modelos simplificados, o que pode não representar o real comportamento dos usuários, assim como as características locais.

Além disso, segundo Roetzel et al (2010), esses modelos simplificados de comportamento podem não refletir todos os parâmetros que influenciam na ventilação, pois muitos deles estão relacionados ao desenho da fachada, como já fora supracitado, a forma da janela, tamanho e localização na fachada, tipo de abertura, ângulos e porcentagens de abertura e a influência de dispositivos de sombreamento. Porém, há outras influências, relacionadas às características individuais dos ambientes interno e externo, tais como a qualidade do ar interno, colocação de mobiliário, qualidade do ar externo e ruído, os quais são muito específicos e geralmente não são conhecidos ainda em estágios iniciais do projeto.

De acordo com Rijal et al (2007), embora o impacto do comportamento do ocupante na energia operacional dos edifícios seja grande, o mesmo não está bem representado em modelos de simulação, de modo que se tem feito várias pesquisas com hipóteses variadas

⁵ CFD (Computational Fluid Dynamics), ou Dinâmica de fluidos computacional, é uma parte da mecânica que utiliza métodos numéricos e algoritmos para resolver e analisar questões que envolvem escoamento de fluidos.

sobre o comportamento de abertura da janela pelos ocupantes, tais como: 1) um padrão de janelas abertas é criado com base na ocupação, com ou sem evidências de campo; 2) a abertura da janela é controlada pela temperatura, chuva, vento, umidade, baseada em suposições sobre o comportamento; 3) as janelas são controladas para fornecer uma determinada taxa de renovação de ar, e podem estar mais relacionadas à qualidade do ar interior ou ventilação mínima, do que ao conforto térmico, se for adotado que o ocupante irá utilizar as aberturas de janelas para atingir as taxas de ventilação projetadas. Assim, tais pressupostos de abertura da janela não expressam necessariamente o comportamento dos ocupantes reais, sendo necessário utilizar um algoritmo para abertura da janela com base em investigações de campo em escritórios reais.

Para o estudo de Rijal et al (2007), o comportamento de abertura da janela foi adotado em grande parte pela busca de conforto, pois o ato de abrir uma janela produz uma mistura de ar interior e exterior e (quando a temperatura exterior é baixa) há uma diminuição na temperatura interna. O período de tempo que a janela permanecia aberta foi controlado pelo tempo necessário para resfriar o ambiente, de maneira que os ocupantes chegassem a sentir desconforto por frio. Se a sala não fosse resfriada o suficiente para causar o desconforto, a janela se mantinha aberta.

A proporção de janelas abertas está fortemente associada à temperatura, haja vista que as pessoas são mais propensas a abrir janelas quando as temperaturas interior e exterior são elevadas, demonstrando a importância da compreensão do comportamento do usuário para se prever a energia operacional usada em edifícios, o que pode contribuir de maneira positiva para a discussão da sustentabilidade dos edifícios naturalmente, mecanicamente e hibridamente ventilados (RIJAL et al, 2007).

A adoção de estratégias passivas de controle térmico, reduzindo assim a dependência de sistemas ativos, pode gerar projetos mais sustentáveis, de modo que os edifícios naturalmente ventilados (NV) com ocupantes controlando janelas podem ser uma alternativa. No entanto, enquanto as pessoas podem preferir maiores oportunidades "adaptativas" (de controle do edifício), elas podem não apreciar as condições termicamente desconfortáveis que ocorrem em tais edifícios durante condições térmicas excepcionalmente quentes ou frias (DEUBLE e DE DEAR, 2012).

Sobre as normas vigentes, a *Ashrae Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (ASHRAE, 2004) estabeleceu, recentemente, que os usuários poderão tolerar maiores variações nas condições ambientais se tiverem maior controle sobre elas (operando as janelas de acordo com sua própria vontade e podendo alterar a sua vestimenta). Assim, os projetistas terão mais flexibilidade em estabelecer quando o condicionamento artificial de ar será requerido num edifício e quando será possível integrar a ventilação natural, promovendo o conforto térmico no ambiente (FIGUEIREDO, 2007).

Assim, serão apresentados alguns trabalhos relacionados ao uso da ventilação natural em projetos: Gratia e HERDE (2003), Figueiredo (2007), Rijal et al (2007) e Zhai et al (2011).

No trabalho de Gratia e HERDE (2003) foram realizadas simulações computacionais por meio do *software* OPTI em dois edifícios de escritórios, sendo o primeiro um edifício de três andares (antigo, com pouco isolamento e alta inércia) e o segundo com cinco andares (moderno, com muito isolamento e pouca inércia), ambos localizados na Bélgica. No primeiro foram estudadas a influência de vários parâmetros: nível de isolamento, os ganhos internos, estratégias de ventilação e massa térmica; já no segundo, foram estudadas a influência da orientação, os ganhos solares, dispositivos de sombreamento e as estratégias de ventilação. Para a análise dos dois edifícios foram fixados alguns dos parâmetros como, por exemplo, no primeiro foi fixada a área da janela e a orientação, e no segundo estudo foi fixado o nível de isolamento e ganhos internos. A ocupação ocorre das 8h às 18h e os sistemas de arrefecimento são ligados uma hora antes, a fim de ter atingido o conforto no início do período de ocupação. As simulações foram feitas para vários níveis de ganhos internos.

Através das simulações paramétricas foi possível verificar que o isolamento proporciona um efeito benéfico no inverno, mas também impede que os ganhos de calor deixem o espaço no verão, durante os períodos em que a temperatura externa é menor do que a interna. Para o mesmo nível de ganhos internos, um edifício com melhor isolamento é mais quente no verão do que uma construção semelhante, com menos isolamento.

Ao mesmo tempo, segundo os autores, a ventilação exerce um papel fundamental no controle da temperatura no interior de um edifício no verão. No caso de construções razoavelmente ou fortemente isoladas, a influência da ventilação é muito grande quanto maior for o isolamento do edifício.

De acordo com Gratia e HERDE (2003), em um edifício com alta inércia, a ventilação noturna pode ser tão eficaz quanto a diurna. Já em edifícios com pouca inércia (sem massa térmica), a ventilação diurna é mais eficiente, uma vez que esses edifícios são resfriados rapidamente durante a noite, mas sobem a temperatura muito rapidamente com os ganhos de calor internos e solares durante o dia.

A partir dos resultados alcançados foi possível gerar indicações de projeto para o clima da Bélgica, na tentativa de ajudar arquitetos a projetar edifícios energeticamente eficientes com um bom clima interno, considerando tais questões: a) isolar o edifício e ter boa estanqueidade ao ar; b) limitar e controlar os ganhos internos; c) ter uma boa escolha da área de janelas e orientação; d) ter ventilação adequada; e) promover a inércia térmica.

No trabalho de Figueiredo (2007), considerando os benefícios de oferecer como estratégia de conforto térmico a ventilação natural, foi feita uma pesquisa na cidade de São Paulo, cujos objetivos foram avaliar possibilidades e limitações do uso da ventilação natural como recurso passivo de resfriamento dos ambientes de escritórios e responder a questão de que é possível utilizar a ventilação natural para obtenção de conforto térmico em edifícios de

escritórios na cidade de São Paulo. A pesquisa foi realizada com simulações computacionais de um modelo representativo e visou mapear os períodos de conforto térmico durante o ano, em um edifício de escritórios típico, com ventilação natural. Os resultados apontam que é possível utilizar-se da ventilação natural para obter o conforto térmico em escritórios e as melhores orientações para evitar o uso de ar condicionado são sudeste e sul; e as piores, sudoeste, oeste e noroeste.

No trabalho de Rijal et al (2007), foram estudadas formas de se estruturar um "algoritmo adaptativo" para prever o comportamento dos usuários ao abrir as janelas e como o algoritmo pode ser utilizado dentro de uma simulação para permitir a quantificação dos efeitos da abertura da janela no conforto e no uso de energia elétrica. Foi verificado que: a) a proporção de janelas abertas depende das condições do interior e exterior, b) a análise de regressão estatística pode ser usada para formular um algoritmo de adaptação para prever a probabilidade de que as janelas são abertas, c) o algoritmo quando incorporado ao programa de simulação fornece compreensões que não estão disponíveis usando métodos de simulação mais usuais e permite a quantificação do efeito do projeto do edifício no comportamento de abertura da janela, conforto dos ocupantes e uso de energia do edifício.

Em estudos de iluminação, há a discriminação dos ocupantes em usuários "ativos" e "passivos". Foi verificado que em relação à ventilação ocorre o mesmo, isto é, usuários ativos abrem mais as janelas que os passivos.

Dessa forma, foi utilizada a abordagem adaptativa que sugere que a utilização de controles seja desencadeada pelo desconforto do usuário. Os controles são usados para recuperar o conforto. Logo, o tipo de abertura da janela é apenas uma consideração para a caracterização do comportamento dos usuários de escritórios.

A cada hora a temperatura operante, definida pelo usuário para um ponto escolhido, é calculada a partir das temperaturas adequadas de superfície e do ar e é feita uma comparação com a temperatura de conforto para indicar se o ocupante seria susceptível a suportar um ambiente mais quente ou mais frio do que desejado.

Se a temperatura operante é mais do que 2 K acima da temperatura de conforto, o estado é "quente", se a temperatura operante é mais do que 2 K abaixo da temperatura de conforto, o estado é "frio". Quando o ocupante estiver "confortável" (nem "quente" nem "frio"), então nenhuma ação será tomada e a janela permanece como estava. Já se o estado operativo for "quente" e a janela estiver fechada, a mesma será aberta. Se o estado operativo for "frio" e a janela estiver aberta, a mesma será fechada. Se o estado operativo for "quente" e a janela é aberta, então nenhuma ação será tomada, e se o estado operativo for "frio" e a janela é fechada, então nenhuma ação será tomada.

As simulações mostraram que a proporção de dias ocupados quando a janela foi aberta, em algum momento durante o dia variou de 0.05 no inverno para 0.59 no verão. O modelo de escritório celular foi usado para a análise do consumo anual de energia para

aquecimento. O modelo foi executado com e sem o algoritmo adaptativo de Humphreys⁶. No caso do algoritmo as janelas foram autorizadas a abrir somente durante o horário de ocupação e as janelas estavam fechadas fora dos períodos de ocupação.

Para avaliar os efeitos térmicos do ajuste da janela, a relação entre a probabilidade de que uma janela está aberta e a temperatura interna e externa foram quantificadas. Os resultados obtidos foram os seguintes:

a) A proporção de janelas abertas é mais baixa no inverno, médio na primavera e no outono e mais elevadas no verão, demonstrando-se ser uma função da temperatura interna e externa;

b) A faixa de temperatura entre a abertura e fechamento de janelas (a "zona neutra") é cerca de 4 K;

c) Um algoritmo para abertura da janela foi desenvolvido com base no princípio de adaptação que as ações deste tipo são tomadas para reduzir o desconforto;

d) Os mapeamentos produzem previsões semelhantes para a distribuição de janelas abertas e fechadas;

e) Um algoritmo (o algoritmo adaptativo de Humphreys) foi implementado no software ESP-r⁷, que usa a teoria de adaptação para prever a probabilidade de as janelas serem abertas. O algoritmo apresentou resultados semelhantes aos extraído a partir dos dados da pesquisa. O comportamento da janela aberta representado pelo algoritmo mostrou ser mais sensível às alterações nos parâmetros do edifício em uma abordagem não adaptativa.

f) A implementação do algoritmo adaptativo Humphreys na simulação de um escritório sugeriu que o projeto do edifício conduz à melhoria do conforto, diminuindo o uso do comportamento adaptativo de janelas e gerando uma redução na demanda anual de energia de aquecimento de 105 para 98 kWh/m².

g) Sugere-se que um algoritmo adaptativo vai representar melhor o controle humano de janelas e permitir uma avaliação mais precisa das condições de conforto térmico e desempenho do edifício, incluindo o consumo de energia no verão e superaquecimento anual.

⁶ Michael Humphreys (1979) propôs o modelo adaptativo, supondo que as pessoas adaptam-se diferentemente ao lugar onde estão sendo as ações adaptativas uma forma de ajuste do corpo ao meio térmico. E o interesse pelo modelo adaptativo pode ser identificado por duas razões principais: por ter sido identificado que os resultados obtidos em câmaras climatizadas divergem dos valores conseguidos nos ambientes climatizados naturalmente; e pela constatação de que a população parece aceitar um intervalo de temperaturas muito maior do que a proposta pelos métodos racionais, já que o indivíduo se adapta ao lugar em que vive (LAMBERTS et al, 2012).

⁷ A ferramenta de simulação dinâmica ESP-r é um software de código aberto que pode ter uso global em projeto e pesquisa. O programa ESP-r permite a análise de muitos aspectos diferentes do desempenho do edifício, tanto por investigações separadas como por estudos integrados com vários elementos acoplados dinamicamente (RIJAL et al, 2007).

h) O algoritmo embutido no programa de simulação vai ajudar no projeto de edifícios mais confortáveis e eficientes energeticamente.

O trabalho de Zhai et al (2011) teve como objetivo avaliar modelos de ventilação por meio de sua capacidade/ aplicabilidade para modelar edifícios reais, com ventilação natural ou híbrida e sistemas de refrigeração, por meio da utilização do *software EnergyPlus*, listando as deficiências dos próprios modelos e/ou analisando em que situações e condições poderiam ser aplicados. Foram analisados três edifícios reais: a) edifício de escritórios da Companhia Renson (Waregem, Bélgica); b) O edifício sede da Bang e Olufsen (Struer, Dinamarca); e c) o edifício Houghton Hall (Luton, Reino Unido).

No primeiro edifício - escritórios da Companhia Renson – a estrutura possui um pavimento elevado com uma fachada envidraçada que cobre principalmente as fachadas sudoeste e noroeste. Este edifício utiliza principalmente variação da ventilação através de aberturas controladas automaticamente. Exaustores de escape são dispostos sobre o telhado (figura 4).

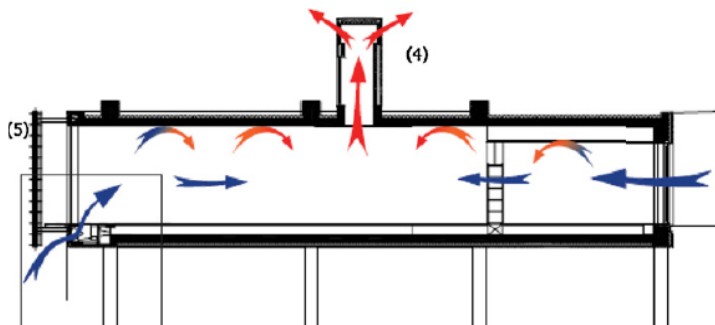


Figura 4: Desenho da ventilação natural no edifício Renson.
Fonte: Zhai et al, 2011.

O segundo edifício (figura 5) – sede da Bang e Olufsen - é uma estrutura elevada de três andares. Cada andar consiste principalmente de planos abertos com espaços para escritórios. Escadarias conectam cada andar com centrais de exaustores localizados sobre o telhado. A fachada norte do edifício é inteiramente envidraçada e contém as principais entradas de ventilação natural do edifício. Outras entradas de ar na fachada sul são utilizadas somente para ventilação noturna.

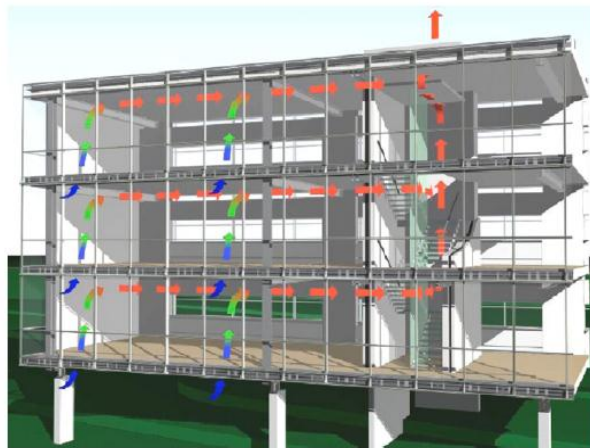


Figura 5: Desenho da ventilação natural no edifício Bang e Olufsen.
Fonte: Zhai et al, 2011.

Já o terceiro edifício (figura 6) - Houghton Hall - possui três andares, nos quais cada andar está aberto para um átrio central. Cinco exaustores com ventiladores para ventilação estão localizados no teto do átrio. O edifício tem dois conjuntos de aberturas, de nível superior e de nível de visão. Cerca de metade das janelas em níveis de visão são operáveis. Acima de cada abertura, de nível de visão há uma pequena abertura de nível superior. Por causa das aberturas neste edifício serem operadas pelos usuários, um número de diferentes combinações de vento e variação de ventilação são testados.

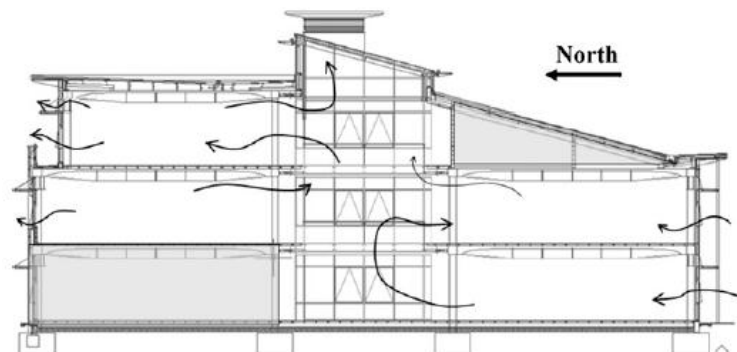


Figura 6: Desenho da ventilação natural no edifício Houghton Hall.
Fonte: Zhai et al, 2011.

Como conclusões desse estudo, as temperaturas resultantes das simulações do primeiro edifício eram extremamente precisas, enquanto os outros dois edifícios foram menos promissores. As diferenças entre o Edifício Renson e os outros dois edifícios são:

- As aberturas utilizadas no Edifício Renson são muito menores do que nos outros dois edifícios;
- O Edifício Renson possui apenas um andar, enquanto os outros dois são ambos de três andares, com todos os três conectados. No Edifício Bang e Olufsen, a conexão é

através de uma escada comum, enquanto que no Houghton Hall há um átrio que conecta todos os níveis do edifício;

- No edifício Renson as aberturas são controladas automaticamente, enquanto que no Houghton Hall são operados manualmente. No Edifício Bang e Olufsen, as aberturas também são controladas, mas o esquema de controle é muito complicado;
- O Edifício Renson não tem exaustores, enquanto os dois outros edifícios têm.

Dessa forma, embora o nível de informação disponível sobre cada edifício varie, as seguintes conclusões podem ser tiradas em relação ao *software EnergyPlus* e em relação às deficiências do objeto *Airflow Network*⁸ no *EnergyPlus*:

- Opções adicionais de controle de ventilação devem ser adicionadas ao *software*, levando outros fatores ambientais em consideração: temperatura exterior, velocidade do vento, direção do vento, indicador de chuva;
- Os parâmetros utilizados no *EnergyPlus* para especificar a parte de uma janela que é operável deve ser melhorado. Atualmente, para modular a área de ventilação efetiva, as aberturas devem ser manualmente redimensionadas;
- Um tipo de ligação horizontal de abertura deve ser adicionado. Aberturas horizontais em coberturas de edifícios ventilados naturalmente são muito comuns. Em alguns casos, pode também ser desejável para modelar aberturas horizontais em alturas diferentes em zonas do átrio;
- Uma abertura do tipo conexão no átrio é necessária para os fluxos de modelagem que ocorrem através de aberturas muito grandes. Este fluxo é provavelmente diferente daquele que ocorre através de uma porta em que não há redução de área;
- A opção para controlar os exaustores com base na temperatura é crítica, uma vez que estas são muito comuns em edifícios ventilados naturalmente. O controle do cronograma (*schedule*) atualmente disponível é insuficiente.

Em relação às deficiências do conjunto de dados experimentais a fim de se avaliar completamente o acoplamento entre a ferramenta de simulação de energia e do seu modelo de rede, um conjunto de dados mais completo é necessário a partir de um edifício real naturalmente ventilado.

A lista abaixo apresenta de forma abreviada as deficiências do conjunto de dados primários através dos edifícios modelados neste estudo:

- A temperatura medida no local, solar (globais e horizontais direto normais, como necessários para o arquivo climático), dados do vento;
- Dados de fluxo de volume medidos, em pontos críticos de todo o edifício;
- Nível de massa térmica, tanto estrutural quanto mobiliário;
- Os números exatos e os locais de aberturas ventiladas em todos os momentos;

⁸ *Airflow Network* é o grupo de objetos que permite a configuração e a simulação da ventilação natural no *software EnergyPlus*.

- Área efetiva e coeficientes de descarga para saídas operáveis;
- Os dados de coeficiente de pressão do vento.

Entretanto, de acordo com Roetzel et al (2010), em climas muito quentes não é recomendado que se resfrie o edifício exclusivamente através da ventilação natural, uma vez que o ar externo poderá estar mais quente que o ar interno, fazendo com que o resfriamento não aconteça de forma correta. Nesses casos o ideal é que se resfrie o ambiente por meio de um sistema de condicionamento de ar quando a temperatura externa estiver muito alta. Também é importante que esse uso seja feito apenas quando não é possível resfriar o ambiente por meio da ventilação natural, que pode ser utilizada em outras épocas do ano, criando assim um sistema misto (ventilação natural + ventilação artificial).

Dessa forma, uma boa estratégia para aproveitar ao máximo o potencial existente na utilização de uma tecnologia passiva, dentro das suas limitações, e ainda manter o conforto térmico nos períodos em que ela não for suficiente é a combinação da ventilação natural com o uso de sistemas mecânicos ou condicionadores de ar, representando o que se denomina por ventilação híbrida ou de modo misto (MM).

De acordo com Deuble e De Dear (2012), na época de lançamento da ASHRAE 55/2004, os estudos de conforto realizados em edifícios de modo misto (MM) eram insuficientes, o que significava que eles foram excluídos do âmbito da norma de conforto adaptativo. Além disso, a norma esclarece que quando os sistemas de refrigeração mecânica são fornecidos para o espaço, como é o caso em edifícios de modo misto, o padrão de conforto adaptativo não é aplicável. Assim, a potencial flexibilidade oferecida pela norma não está disponível para edifícios híbridos, que podem operar em um modo passivo de ventilação natural, preferencialmente, equipado com refrigeração apenas suplementar, para os momentos em que a ventilação natural não for suficiente.

Edifícios híbridos ou de “Modo misto”⁹ referem-se a uma abordagem do espaço condicionado que utiliza uma combinação de ventilação natural de janelas operáveis (manualmente ou automaticamente controladas) e sistemas mecânicos.

De acordo com Zhai et al (2011), a literatura mais recente indica um aumento no interesse em ventilação natural e híbrida dentro da comunidade científica, como revelado pelo número exponencialmente crescente de publicações (de 5 artigos em 1994 para 60 artigos em 2009).

A filosofia básica dos edifícios de modo misto ou de ventilação híbrida é manter um ambiente interno satisfatório, alternando entre sistemas naturais e mecânicos para evitar o custo, consumo de energia e consequentes impactos ambientais se comparados a um sistema AC (com ar condicionado) (BRAGER, 2006; LOMAS et al, 2007 apud DRAKE et al, 2010). Tais edifícios podem permitir boa qualidade do ar e conforto térmico, utilizando ventilação

⁹Center for the Built Environment (CBE). University of California, Berkeley. <<http://www.cbe.berkeley.edu/mixedmode/aboutmm.html>>. Acesso em 20 jun. 2012.

natural e janelas operáveis sempre que as condições climáticas externas são favoráveis mas reverte para o sistema de condicionamento artificial de ar sempre que a temperatura externa não for favorável (DRAKE et al, 2010).

Dessa forma, conforme fora supracitado, quando a ventilação natural não for suficiente, a ventilação híbrida (VH) (uso de sistemas mecânicos suplementares juntamente com as forças naturais) oferece uma boa solução. A ventilação híbrida permite que um edifício desfrute dos benefícios da ventilação natural, e ao mesmo tempo opere em um nível de conforto térmico desejável (ZHAI et al, 2011).

De acordo com o CBE¹⁰, um edifício bem concebido de modo misto começa com um bom desenho de fachada para minimizar as cargas de resfriamento. Em seguida, integra o uso de ar condicionado quando e onde é necessário, com o uso de ventilação natural, sempre que esta seja possível ou desejável, para maximizar o conforto enquanto evita a significativa utilização de energia e os custos de funcionamento do ar condicionado durante todo o ano.

O ar condicionado e as janelas operáveis podem trabalhar juntos de três formas diferentes: a) simultâneo (mesmo espaço, ao mesmo tempo); b) alternado (mesmo espaço, tempos diferentes); c) zoneado (espaços diferentes, ao mesmo tempo).

A operação de modo misto simultânea (figura 7) é a estratégia de projeto mais utilizada na prática atual, em que o sistema de ar condicionado e janelas operáveis atuam no mesmo espaço e ao mesmo tempo.

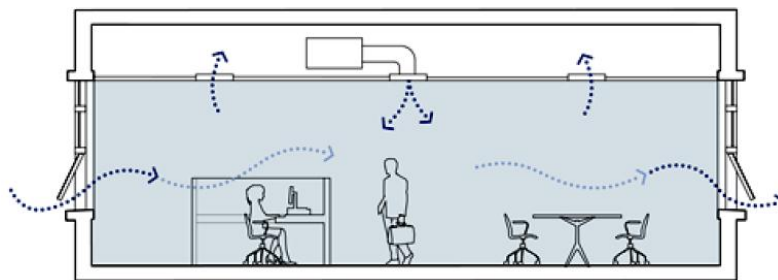


Figura 7: Modo de operação simultâneo.

Fonte: <<http://www.cbe.berkeley.edu/mixedmode/aboutmm.html>>

Já no segundo modo misto, o edifício "alterna" entre a ventilação natural e ar-condicionado numa base sazonal ou mesmo diariamente (figura 8). O sistema de automação predial pode determinar o modo de operação com base na temperatura externa, sensor de ocupação, um sensor de janela (aberta ou fechada), ou com base em comandos do operador.

¹⁰ Idem.

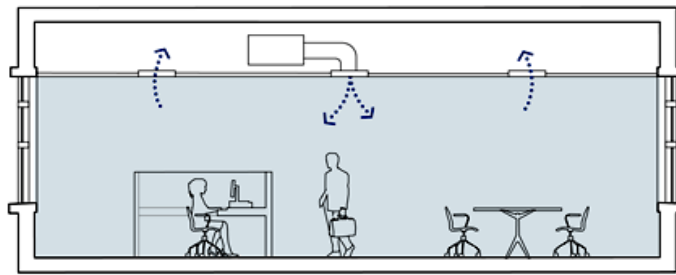


Figura 8: Modo de operação alternado.

Fonte: <<http://www.cbe.berkeley.edu/mixedmode/aboutmm.html>>

No terceiro modo misto, o denominado “zoneado” (figura 9), as zonas diferentes dentro do edifício têm estratégias de condicionamento diferentes. Exemplos típicos incluem edifícios de escritórios naturalmente ventilados, com janelas operáveis e um sistema de aquecimento / ventilação ou dutos de refrigeração mecânica suplementar fornecida apenas para salas de conferências.

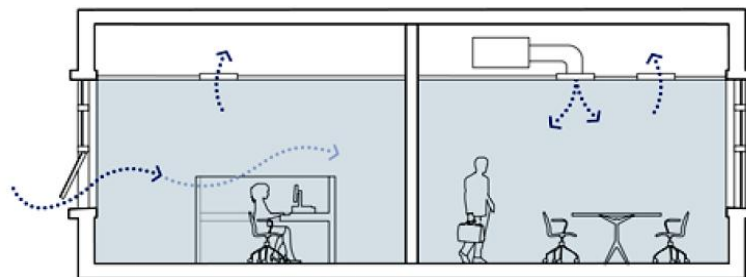


Figura 9: Modo de operação zoneado.

Fonte: <http://www.cbe.berkeley.edu/mixedmode/aboutmm.html>

De acordo com Brager et al (2000), os edifícios de modo misto oferecem três principais vantagens em relação aos edifícios com ar condicionado (AC):

1) Redução no consumo de energia com condicionamento artificial de ar: um bom edifício de modo misto pode reduzir ou eliminar o uso de sistemas mecânicos de resfriamento ao longo do ano. Utilizar a ventilação advinda do ar externo pode reduzir o gasto de energia de um edifício comercial de 15% a 80%, dependendo do clima, capacidade de resfriamento e tipologia do edifício.

2) Alta satisfação por parte dos usuários: edifícios de modo misto podem oferecer altos graus de controle aos ocupantes sobre suas condições térmicas e de ventilação, o que pode aumentar a satisfação por parte dos usuários e reduzir potenciais problemas nos índices de qualidade do ar (IQA)¹¹.

¹¹ O índice de qualidade do ar é uma ferramenta matemática criada em 1981 usando como base uma longa experiência desenvolvida no Canadá e EUA, e foi desenvolvida para simplificar o processo de divulgação da qualidade do ar. Esse índice indica a quantidade de cada poluente no ar que pode

3) Edifícios mais “harmoniosos”: estratégias híbridas podem fornecer flexibilidade ao sistema de condicionamento de ar do edifício, resultando em mais vida útil, maior adaptação às mudanças de uso do ambiente e redução nos custos de ciclo de vida.

Já em relação às desvantagens, as estratégias de modo misto têm o potencial de acrescentar custo e complexidade a um edifício, e na pior das hipóteses poderia render ocupantes frustrados e consumo de energia em excesso do sistema de condicionamento artificial de ar. Por haver menos familiaridade com este modo, poderia ser necessário mais tempo para adaptação do que com os edifícios convencionais com sistemas padrão de sistema de condicionamento artificial de ar (HVAC).

Um quadro-resumo (quadro 1) é apresentado com as principais características e diferenças dos sistemas de edifícios naturalmente ventilados (NV), com ar condicionado (AC) e de modo misto (MM).

Quadro 1: Características recomendáveis dos edifícios com ventilação natural, ar condicionado e modo misto.

	Naturalmente Ventilados (NV)	Ar condicionado (AC)	Modo misto (MM)
Forma do edifício	Pequenas placas de piso que permitem ventilação cruzada e são típicos os tetos com altura generosa.	Grandes placas de piso com preferência para tetos relativamente baixos.	Uma profundidade de planta de menos de 15 metros é recomendado para se ter total vantagem da ventilação natural.
Envoltória do edifício	O revestimento e a estrutura ajudam a diminuir as oscilações de temperatura diurna. Coberturas externas são usadas para o controle solar.	O revestimento é leve e feito para ser hermeticamente fechado. São utilizados vidros escuros para controlar o ganho de calor.	Isolamento térmico na construção e estrutura devem ser utilizados para diminuir as oscilações de temperatura. Coberturas externas são preferíveis.
Janelas e iluminação	Janelas são relativamente pequenas e operáveis. A luz natural é preferida para evitar ganho de calor interno, associada à iluminação artificial.	Os vidros são fechados e, na maioria das vezes, são escuros, para limitar o ganho de calor solar. Paredes altas de vidro são comuns e luzes fluorescentes são um padrão.	As janelas são operáveis e podem incluir controle automático ou manual. Os controles das janelas e o design são mais complexos que o de ventilação natural ou ar condicionado.
Controle de sistemas	O controle das condições internas depende do comportamento do ocupante. Os ocupantes devem prever e responder às condições externas para determinar o quanto o edifício deve ser ventilado.	Os controles do ar condicionado são complexos e são geralmente controlados por sistemas automáticos, usando controle de <i>feedback</i> .	O controle deve ser uma síntese de controle automático e manual. Ambas estratégias - <i>feedback</i> (responsivo) e <i>feed-forward</i> (preditivo) – devem ser empregados.
Conforto do ocupante	O conforto do ocupante é muito dependente das condições externas, que podem variar significativamente, sazonalmente e diariamente.	O sistema do ar condicionado tenta manter a condição térmica uniforme. O conforto do ocupante está diretamente ligado à performance do mesmo.	Os ocupantes têm a opção de escolher o que usar. Se a ventilação natural não for suficiente, o ar condicionado pode ser utilizado ou vice-versa.
Taxa de ventilação e índice de qualidade do ar (IQA)	As taxas de ventilação são relativamente altas durante temperaturas externas altas. O índice de qualidade do ar raramente é um problema.	A taxa de ventilação é quase sempre fixada em uma posição mínima. O ar condicionado pode ocasionar problemas no IQA se não forem feitas manutenções frequentes.	Na média, a taxa de ventilação será maior que se for apenas com ar condicionado. A ventilação natural pode dar um alívio se o IQA diminuir.
Energia HVAC	Pouca energia consumida.	O consumo de energia pode variar dependendo do design do sistema e da operação, em muitos casos o sistema opera ineficientemente por um grande período com pouca ou nenhuma manutenção.	O consumo de energia deve ser menor que se utilizado somente o ar condicionado. Porém, pode haver desperdício de energia se a ventilação natural e o ar condicionado não forem coordenados cuidadosamente.

Fonte: Adaptado de BRAGER et al, 2000.

De acordo com Brager et al (2000), os edifícios com ar condicionado (AC) geralmente possuem uma envoltória hermética, sendo resfriados por sistemas de condicionamento de ar, que tendem a manter condições uniformes de temperatura no interior dos ambientes, mas, em termos de consumo, tais sistemas são associados a grandes impactos no consumo de energia elétrica.

Por outro lado, nos edifícios naturalmente ventilados (NV), a envoltória é composta por janelas operáveis que pode promover tanto a ventilação quanto o resfriamento do ambiente, gerando menores custos de energia, se comparados aos edifícios AC (com ar condicionado). Nesses edifícios (NV), os ocupantes geralmente possuem significativo controle sobre suas condições de conforto, sendo estas mais variáveis e menos preditas que nos edifícios com ar condicionado (AC), mas não necessariamente menos confortáveis (BRAGER et al, 2000).

Já os edifícios de modo misto (MM) possuem uma abordagem híbrida que combina ventilação natural com sistemas mecânicos de ventilação e resfriamento. Um bom edifício MM pode incorporar sofisticados controles que permitem ao edifício alterar entre esses dois modos apresentados anteriormente (NV e AC), para maximizar o conforto ao mesmo tempo em que evita um significativo gasto anual de energia com ar condicionado (BRAGER et al, 2000).

Serão apresentados alguns trabalhos que utilizam estratégias de ventilação híbrida por meio da integração da ventilação natural com sistemas mecânicos, os edifícios de modo misto (MM): Aggerholm (2003), Ezzeldin et al (2009), Rupp (2011) e Deuble e De Dear (2012).

No trabalho de Aggerholm (2003), são apresentados cinco exemplos de ventilação híbrida e estratégias de controle em edifícios de escritórios. Os edifícios apresentados são: 1) PROBE (Bélgica); 2) IVEG (Bélgica); 3) Sede da BeO (Dinamarca); 4) I Guzzini Illuminazione (Itália); e 5) Centro Tecnológico de Fujita (Japão).

O primeiro exemplo é o edifício PROBE, na Bélgica, constituído por 5 andares, 14m de extensão e 1100m² de área com células de escritórios, os quais comportam uma ou duas pessoas. O edifício está localizado numa área sem poluição e barulho. Há um sistema de ventilação mecânica que fornece ar para os escritórios e exaustor nos banheiros, cuja proposta é manter um nível aceitável de qualidade do ar quando as janelas são fechadas durante as horas ocupadas. Tal sistema é controlado por um sensor de presença localizado em cada escritório. O índice de qualidade do ar (IQA) é medido e regulado por um sistema automático. Nesse exemplo, os usuários afirmam que essa estratégia realmente melhora a performance do edifício, no entanto, para a utilização da ventilação noturna (que é utilizada durante a noite toda), é necessário um sistema de controle, pois pode acabar acarretando aquecimento ou resfriamento excessivo nos ambientes.

O edifício IVEG, também na Bélgica, é composto por três andares, 17m de extensão e uma área de 1500m² compostas por células de escritórios e está localizado numa área com muito tráfego de veículos, gerando barulho e poluição. O sistema de ventilação mecânica

fornece ar pré-aquecido aos escritórios e há exaustores nos banheiros. Um pequeno resfriamento mecânico pode reduzir e fornecer ar para o sistema de ventilação com temperaturas 2°C abaixo da externa. O sistema é controlado por sensores de presença, enquanto ventiladores ajustam a velocidade para manter uma pressão constante no duto. Nesse sistema, não há uma integração entre os medidores de IQA e o sistema de ventilação mecânica, fazendo com que este funcione de forma inadequada.

O edifício sede da BeO, na Dinamarca, é composto por três andares, 1650m² de área com escritórios, que está localizado numa área aberta, sem poluição do ar externo e barulho. Essa edificação incorporou a ventilação natural por meio de um sistema com ventiladores, que controlam a demanda por ventilação através de sensores de CO₂ localizados no nível do piso dos escritórios. A entrada de ventilação é controlada por um sistema gerenciador, que incorpora uma estação meteorológica no telhado. Se a temperatura externa for inferior em 5°C, então o sistema de ventilação é fechado para proteger a abertura da cobertura, assim como durante chuvas ou altas velocidades de vento. Durante o período de monitoramento, foi encontrado um baixo consumo de eletricidade obtido dos ventiladores. Entretanto, foi percebido que os sensores de CO₂ não eram confiáveis, ao passo que o aquecimento localizado abaixo do piso (que serviria para prevenir a sensação de frio vinda das janelas) gerava sobreaquecimento quando a ventilação híbrida estava ligada.

O edifício I Guzzini Illuminazione, na Itália, é composto por quatro andares com área total de 3000m² e ocupado por 45 pessoas e é localizado numa área aberta, sem poluição e barulho. O edifício é retangular com um átrio central. A ventilação natural é usada para compensar os ganhos de calor internos por meio do resfriamento pelo ar externo. Se a ventilação natural não for suficiente, um sistema de ventiladores é acionado para prover o resfriamento do ambiente. A ventilação noturna é utilizada para resfriar a estrutura do edifício quando a ventilação híbrida não funciona. O controle da ventilação é totalmente automático numa central de controle limitado pelo usuário. Quando a temperatura interna é menor que 20°C ou maior que 23°C o edifício opera em modo mecânico, inicializando o sistema de ventiladores. As desvantagens: em operação, o sistema de abertura das janelas centralmente automatizados estava desconectado porque cada ocupante queria fazer o seu próprio ajuste no conforto térmico, fazendo com que a ventilação noturna parasse de funcionar para não acarretar num resfriamento excessivo do ambiente. O inicial entusiasmo expressado pelos proprietários e projetistas do edifício não os encorajaram a maximizar o uso da ventilação natural. Infelizmente, o esforço necessário não foi dedicado para ajustar o sistema para ventilação natural.

O edifício do Centro Tecnológico de Fujita, no Japão, é composto por três alas de escritórios, um átrio e um laboratório, localizados numa área aberta, sem poluição e barulho. A ala dos escritórios é composta por ventilação natural e ar condicionado, operando dependendo da hora do dia e das condições climáticas. No inverno o edifício é aquecido

pelo sistema condicionador de ar e as aberturas de ventilação natural são fechadas. No verão, o sistema de ventilação natural é usado para resfriar a estrutura através da ventilação noturna. Nas estações intermediárias a ventilação natural é acionada se a entalpia do ar externo for menor que a entalpia do ar interno. As aberturas de ventilação natural são fechadas em altas temperaturas, alta velocidade do ar ou durante períodos de chuva. Os ocupantes podem operar as aberturas durante os horários de ocupação dos escritórios. A ventilação noturna é acionada se a temperatura externa, durante as horas não ocupadas, for menor que 23°C. Durante resfriamento noturno tanto as entradas quanto as saídas de ar são abertas totalmente. Uma vez que o sistema de condicionamento artificial de ar foi ligado, a ventilação natural nunca é colocada em operação novamente em seguida ou no mesmo dia. Segundo o autor, isso ocorre devido à alta entalpia¹² do ar externo em comparação com a baixa entalpia do ar interno.

Como conclusão desse trabalho, foi mostrado como trabalhar com os controles de ventilação híbrida em células de escritórios nas quais os usuários tinham total responsabilidade pelo clima interno durante as horas de ocupação. Esse controle individual pode ser manual ou automatizado e pode ser operado por um painel ou pelos computadores dos usuários. Durante as horas não-ocupadas o controle automático é necessário para garantir os benefícios de resfriar a estrutura do edifício pela ventilação noturna. Controles automáticos podem também ser necessários para restaurar o sistema de ventilação no final do dia de trabalho, por exemplo fechando as janelas e desligando os ventiladores para economizar energia. Em escritórios de planta livre, controles automáticos são necessários, mas é difícil encontrar uma estratégia aceitável para o controle das janelas.

No trabalho de Ezzeldin et al (2009), foram feitas simulações computacionais no programa *EnergyPlus* a fim de avaliar a performance de quatro edifícios de escritórios que utilizam estratégias de ventilação híbrida e o potencial de redução de energia em cada clima estudado, sendo todos correspondentes a regiões áridas, que são: Alice-Springs (Austrália), Bahrain, El Arish (Egito) e Madinah (Arábia Saudita). O resfriamento efetivo dos edifícios de escritórios em climas áridos necessita de particular atenção, haja vista que a demanda por resfriamento é afetada não apenas pelas condições climáticas severas, mas também pelas altos ganhos de calor internos pelos ocupantes, iluminação e equipamentos que devem ser esperados em edifícios de escritórios modernos. Por conta disso, os projetistas são propensos a adotar integralmente o ar condicionado para edifícios de escritórios, podendo em muitos casos, garantir que as condições de conforto sejam mantidas mas o custo é relativamente alto, e emite muito gás carbônico.

Um protótipo de edifício foi feito para as simulações, constituído por uma típica zona retangular de altura média em um edifício com dimensões de 3m x 20m x 3.5m. Foram

¹² Entalpia, ou conteúdo total de calor (H, em kJ), é a soma entre a energia interna do sistema e o produto entre a pressão e o volume (ASHRAE, 2001).

montadas cinco tipos de estratégias: 1) Ventilação de modo misto: ventilação natural e complementação com ar condicionado durante as horas de ocupação; 2) ventilação de modo misto + ventilação noturna; 3) ventilação de modo misto + resfriamento evaporativo direto; 4) ventilação de modo misto com resfriamento radiante acoplado à torre de resfriamento (resfriamento evaporativo indireto); e 5) ventilação de modo misto com componentes de resfriamento acoplados aos trocadores de calor. Em comparação à essas estratégias foram simulados os edifícios com ar condicionado funcionando em tempo integral (nos horários ocupados).

Como resultado tem-se que o consumo de energia nos sistemas de modo misto mostrou uma notável economia de energia, se comparado aos sistemas com ar condicionado utilizado em tempo integral. Os resultados das simulações indicam que estratégias de resfriamento de modo misto são muito atrativas e podem ser consideradas nos projetos de edifícios de escritórios em climas áridos. Algumas das mais significantes economias de energia (mais de 40%) podem ser alcançadas em climas quentes, sendo que em situações que permitem a ventilação noturna essa redução se mostra na faixa dos 67%.

No trabalho de Rupp (2011), foram feitos estudos em um edifício de escritórios para a cidade de Florianópolis, cujo modelo representativo é composto por duas salas localizadas em lados opostos, que foram simuladas para as orientações norte/sul e leste/oeste. O estudo foi feito com base em quatro casos-base a saber: a) caso 1: ar condicionado e iluminação artificial acionados durante todo o período de ocupação; b) caso 2: ar condicionado utilizado direto (nos períodos de ocupação) e iluminação natural integrada à artificial (sistema dimerizável); c) caso 3: Utilização da ventilação híbrida e apenas iluminação artificial; e d) caso 4: ventilação híbrida e integração da iluminação natural com a artificial (sistema dimerizável). Tais casos foram simulados para 10 variações de abertura de fachada (de 10% a 100%). Como resultado, o autor mostra que, comparando-se os casos de ventilação híbrida a do caso base (em que há apenas utilização de iluminação e condicionamento artificial), há considerável redução no consumo total de energia elétrica, sendo que o caso 2 obteve redução de 50,5%, enquanto que o caso 3 obteve 31,9% e no caso 4 obteve-se uma redução de 64,9%. É importante observar que a maior redução apresentada é a do caso 4, em que há um sistema de iluminação eficiente e ventilação híbrida, em relação ao caso base, enquanto que a menor redução é apresentada no caso 3, em que se trabalha apenas com iluminação artificial e ventilação híbrida, demonstrando que o impacto no consumo advindo de um sistema eficiente de iluminação pode gerar mais reduções no consumo de energia elétrica total.

O trabalho de Deuble e De Dear (2012), investiga como o conforto dos ocupantes é afetado em um edifício que muda entre AC e ambientes NV, ou seja, em um edifício MM. Se um edifício é AC, então ele geralmente não possui janelas operáveis. De acordo com a

ASHRAE Standard 55 (2004), se um edifício é NV, então ele não tem nenhum sistema mecânico de refrigeração / aquecimento, mas normalmente tem janelas operáveis.

O estudo de caso é um edifício localizado na região metropolitana de Sydney, Austrália, composto por 7 andares ocupados pela parte acadêmica e administrativa da Faculdade de Economia e Negócios. Como representado na figura 10, a zona norte e sul do perímetro consiste em um edifício de modo misto (MM) com células de escritórios com janelas operáveis separados por uma zona de plano aberto central com condicionamento de ar ligado o tempo todo.

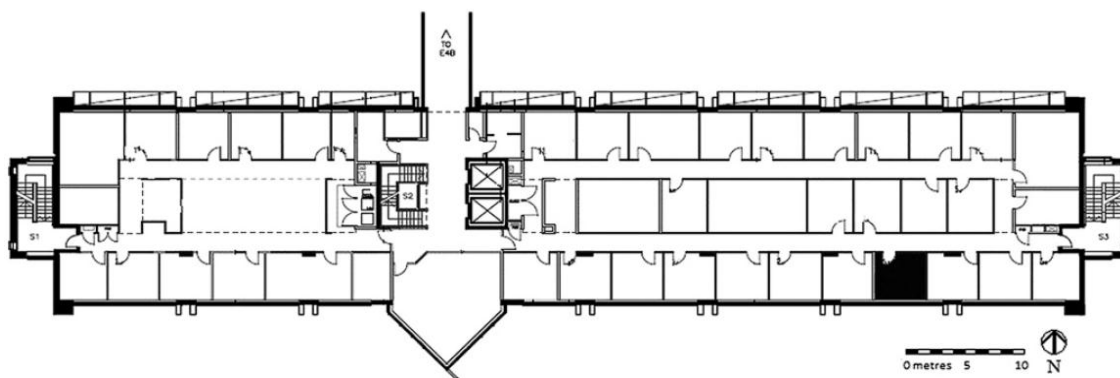


Figura 10: Planta pavimento tipo do edifício de escritórios.
Fonte: DEUBLE e DE DEAR, 2012.

Foram obtidos dados objetivos simultâneos (clima interno e externo) e subjetivos (auto avaliação de percepções de conforto), medidos e coletados ao longo deste estudo, de forma que medidores foram aleatoriamente localizados ao longo do edifício para registrar a temperatura do ar, temperatura de globo e umidade relativa em intervalos de 5min para ambos os modos (NV e AC). Questionários foram entregues a cada usuário em sua estação de trabalho, de modo que os ocupantes pudessem registrar a sua percepção em relação ao seu ambiente térmico. A aceitabilidade térmica foi tratada como uma resposta binária 'aceitável' ou 'inaceitável', em que os ocupantes listavam se eles preferiam ter o ambiente "mais quente", "frio" ou "sem alterações" (DEUBLE e DE DEAR, 2012).

As temperaturas operantes calculadas a partir dos medidores das estações de trabalho revelam a gama de temperaturas de ocupantes no edifício. Estes dados demonstraram que o ambiente interno (em ambas zonas Norte e Sul) raramente ultrapassa uma temperatura interior operante de 25°C, sugerindo que o algoritmo do edifício funciona bem para manter a temperatura interna dentro da faixa dos 5°C (20°C e 25°C) programada para ele.

Ao comparar ambos os votos de sensação térmica, observados e previstos em modos AC e NV, o modelo de conforto adaptativo foi encontrado para ser aplicável ao edifício MM, especialmente quando há ventilação natural. Ao avaliar a atual definição e alcance dos padrões de conforto adaptativos em ASHRAE 55 - 2010 e EN15251-2007, este trabalho fornece

evidências de que os edifícios MM poderiam de fato ser definido como NV, com janelas operáveis e complementares de refrigeração / aquecimento durante períodos de pico.

De acordo com Deuble e De Dear (2012), essas descobertas ajudam a lançar luz sobre a forma como edifícios de modo misto, especialmente com mudança de estratégias de controle, devem ser classificados em padrões de conforto futuro. No entanto, tais edifícios como mais prováveis de serem construídos no futuro, são necessários mais estudos de campo (usando diferentes estratégias de controle e em climas diferentes) para entender completamente como a ventilação híbrida afeta o conforto dos ocupantes e se um padrão de conforto novo deve ser estabelecido.

Dessa forma, conforme fora apresentado, a ventilação natural configura-se como importante elemento a ser considerado desde as etapas iniciais do projeto arquitetônico, e sua implementação deve ser feita de maneira planejada e não por acaso. O uso combinado de ventilação natural e sistemas mecânicos (modo misto ou ventilação híbrida) pode contribuir de maneira satisfatória com o conforto térmico nas edificações e auxiliar na redução do consumo energético, principalmente nos edifícios de escritórios, em que a alta carga térmica, aliada a grandes panos de vidro e a ocupação prolongada do espaço fazem com que o consumo de energia elétrica seja elevado.

2.4. A Iluminação Natural

De acordo com Walter Khöler, o homem é profundamente afetado pela luz mais do que por qualquer outra sensação, já que é um ser visual. Cores e luz determinam a percepção do entorno físico através dos olhos, e dão ao homem a clareza e impressão dos espaços mais do que os sentidos tátil, auditivo e olfativo. (KÖHLER, 1956, apud VIANNA e GONÇALVES, 2001). Dessa forma podemos afirmar que a luz é um elemento importante na concepção dos espaços, uma vez que o ser humano é dependente da luz e aproximadamente 70% da percepção humana é visual (VIANNA e GONÇALVES, 2001).

Segundo Majoros (1998) apud Amorim (2011), utilizar a iluminação natural como estratégia de projeto pode oferecer vantagens no sentido de se obter maior qualidade ambiental e eficiência energética em edifícios, pois a qualidade da iluminação obtida é melhor; a constante mudança na quantidade de luz no ambiente pode ser favorável aos usuários por proporcionar efeitos estimulantes; a iluminação natural produz valores mais elevados de iluminância, se comparados à luz elétrica; um bom projeto tendo a iluminação natural como estratégia pode fornecer ao ambiente iluminação necessária durante 80 a 90% das horas de luz diária, gerando economias com energia elétrica advinda da iluminação artificial; por fim, a luz natural é uma fonte de energia renovável.

A luz natural possui algumas grandezas fotométricas (figura 11) que devem ser definidas de acordo com a NBR 5461/1991 (Iluminação Natural: Terminologia), tais como:

a) Luminância: é a razão dada pelo fluxo luminoso transmitido por um fecho elementar que passa pelo ponto dado e que se propaga no ângulo que contém a direção dada (ABNT, 1991). Segundo Vianna e Gonçalves(2001), os raios luminosos não são visíveis, a sensação de luminosidade é decorrente da reflexão desses raios e essa luminosidade vista é chamada de luminância, logo, a luminância é a luz refletiva, visível. Unidades: cd/m^2 (para superfícies) e cd/cm^2 (para lâmpadas).

b) Iluminância: em um ponto de uma superfície, é a razão do fluxo luminoso incidente num elemento de superfície que contém o ponto dado, para a área desse elemento (ABNT, 1991). Segundo Vianna e Gonçalves (2001), é a luz incidente, não visível. Unidade: $\text{lx}=\text{lm}.\text{m}^{-2}$.

c) Contraste: em sentido perceptivo, é a avaliação da diferença de aspecto de duas ou mais partes do campo observado, justapostos no espaço ou no tempo. Em sentido psicofísico, é uma grandeza associada à diferença de luminosidade percebida (ABNT, 1991). Segundo Vianna e Gonçalves (2001), é a diferença relativa de luminâncias entre um determinado objeto e seu entorno. Sem unidade.

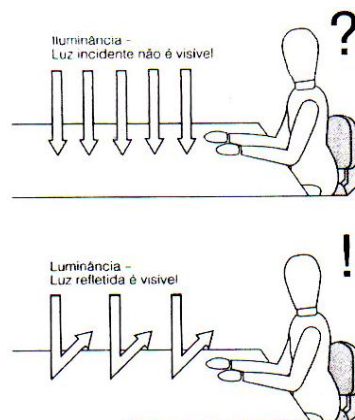


Figura 11: A definição de Iluminância e Luminância.
Fonte: VIANNA e GONÇALVES, 2001.

Outra questão importante na disponibilidade de luz natural é a determinação dos tipos de céu. De acordo com Vianna e Gonçalves (2001),

“Em regiões de clima temperado o céu é predominantemente nublado. No clima quente e seco, com céu claro, este adquire um aspecto azulado e não muito brilhante pela pouca quantidade de partículas de água na atmosfera. Porém, as características de cor do solo destas regiões determinam uma boa capacidade de reflexão da luminosidade. Já no clima quente e úmido, o céu aparece parcialmente nublado e com muita luminosidade, em decorrência, principalmente, de alta quantidade de vapor d'água na atmosfera”.

A norma brasileira NBR 15215-2/2005 (Iluminação Natural – Parte 2: Procedimentos de Cálculo para a Estimativa da Disponibilidade de Luz Natural) denomina as condições de céu (figura 12) como:

a) céu claro (quando há inexistência de nuvens e baixa nebulosidade, sendo que a cobertura de nuvens varia de 0% a 35%);

b) céu parcialmente encoberto ou intermediário (condição climática intermediária entre os céus claro e encoberto, onde a quantidade de nuvens varia de 35% a 75%);

c) céu encoberto (quando as nuvens preenchem toda a superfície da abóbada celeste, variando a quantidade de nuvens de 75% a 100%).



Figura 12: Os tipos de céu.

Fonte: <http://www.usp.br/fau/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0262/Nbr_15215-3_R04_em_3011083.pdf>.

De acordo com a norma NBR 15215-2 (2005), o Fator de Luz Natural (FLN), também chamado de Fator de Luz Diurna (FLD) se estabelece como a razão entre a iluminância num determinado ponto num plano horizontal interno (luz recebida direta ou indiretamente da abóbada celeste), e a iluminação num plano horizontal externo produzida pela abóbada celeste totalmente desobstruída, expressa como uma porcentagem. Essa relação expressa que a quantidade de luz natural interna é alterada juntamente com a variação de luminosidade do céu (externo).

No entanto, índice de FLN não considera apenas influência do céu na quantidade de iluminância interior, mas sim todos os outros fatores, tais como: componente de reflexão externa, como construções vizinhas e relevo do entorno que bloqueiam a visão parcial ou total da abóbada celeste; componente de reflexão interna, paredes, piso e teto; fator de caixilho; fator de manutenção e coeficiente de transmissão do material transparente. (VIANNA e GONÇALVES, 2001).

Dessa forma, obtendo-se os valores de FLN é possível se fazer uma avaliação das características da iluminação em todo o espaço arquitetônico, ainda em estágio de projeto.

O Sol libera cerca de seis bilhões de lumens para cada metro quadrado de sua superfície, sendo que 134.000 lux desse valor alcançam a atmosfera externa da terra, e a partir disso são absorvidos 20% desta luz e refletidos 25% para o espaço. Dentre os 55% restantes,

uma parte chega à superfície da Terra diretamente em forma de feixe de raios paralelos, que é denominada luz direta. Outra fração é difundida pelas camadas da atmosfera, nuvens e outros elementos com a própria composição do ar, o que compõe a chamada luz difusa (VIANNA e GONÇALVES, 2001).

No entanto, como fora supracitado, a luz que vem do Sol atinge as pessoas de várias formas, pois para chegar até elas essa luz passa pela atmosfera (espessa camada de ar), a qual irá permitir a passagem da luz quase completa (luz direta) ou irá difundi-la (luz difusa), o que demonstra que a qualidade do ar influencia na quantidade de luz natural disponível.

Em relação à luz direta, a direção dos raios solares é expressa por dois ângulos (figura 13), a saber: o azimute (α =posição da projeção do raio em relação ao norte verdadeiro ou geográfico), a altura solar (γ =distância em relação à linha do horizonte) e incidência solar (θ =ângulo de incidência dos raios solares em relação à superfície receptora).

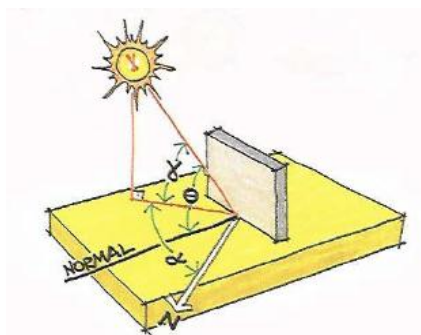


Figura 13: Os ângulos solares.
Fonte: LAMBERTS et al, 1997.

Para tanto, além das condições climáticas comprometidas pela qualidade do ar, a disponibilidade de luz também depende de características geográficas como a latitude, a continentalidade, orientação, inclinação e morfologia do entorno.

Quanto mais alta a latitude, menor será a disponibilidade de luz natural em quantidade e qualidade. A orientação das fachadas é de extrema importância, uma vez que podem gerar enormes ganhos de calor se forem mal posicionadas. Por fim, em relação à inclinação do terreno, pode-se ter o sombreamento em partes da construção, o que também ocorre com a presença de morros e vegetações.

De acordo com Ghisi et al (2005), as janelas são elementos que podem ser responsáveis por boa parte dos ganhos ou perdas de calor nas edificações, de maneira que quando são mal dimensionadas, as janelas podem colaborar significativamente para o aumento no consumo de energia elétrica. Assim, grandes janelas podem ao mesmo tempo gerar altos níveis de iluminância e boa vista para o exterior, e gerar maiores ganhos de calor interno, fato que irá se refletir no consumo de energia com aparelhos condicionadores de ar.

Ao mesmo tempo, segundo Yannas e Corbella (2003), o aumento excessivo das áreas de janelas pode resultar em ofuscamento¹³ para o usuário (figura 14).

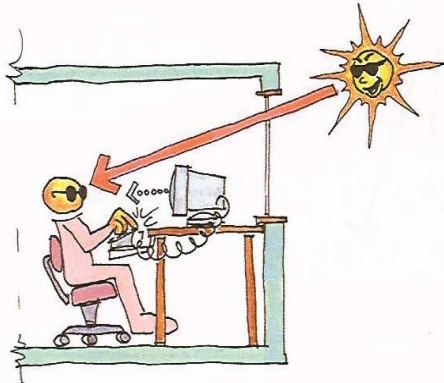


Figura 14: O ofuscamento.
Fonte: LAMBERTS, 1997.

De acordo com Lamberts (1997), o projeto arquitetônico deve relacionar uma série de elementos, tais como: o nível de iluminação de acordo com a atividade a ser desenvolvida no ambiente; a idade das pessoas que irão realizar essas atividades; os possíveis contrastes provocados por manchas de radiação solar direta e as cores das superfícies; a relação de comprimento e largura do ambiente, bem como o pé-direito, o tipo de vidro utilizado, a dimensão das aberturas e a orientação em relação ao norte.

Tendo em vista tais parâmetros, não se pode desconsiderar o fato de que no Brasil as condições de céu proporcionam grande luminosidade em latitudes mais baixas, fazendo com que as janelas grandes sejam um problema pois, segundo Yannas e Corbella (2003), a presença de uma extensa área de vidro pode representar um grande aumento da temperatura interna acompanhando a variação da temperatura externa, ao mesmo tempo em que os ganhos de calor pela radiação solar se convertem em energia térmica no interior do ambiente e podem causar desconforto visual, seja por ofuscamento e/ou contrastes, devido à entrada de radiação solar direta.

É possível destacar dois tipos de aberturas que promovem a entrada de luz natural no ambiente, a saber (YANNAS e CORBELLA, 2003):

a) Iluminação zenital (luz que entra pelo teto): produz uma distribuição de luz mais uniforme, mas as aberturas devem ser protegidas de modo a evitar a entrada de radiação solar direta, o que pode causar um aumento excessivo da carga térmica interna e gerar contrastes.

b) Iluminação lateral (figura 15): quando advém de um lado só, pode causar problemas na distribuição da luz, haja vista que esta diminui com a profundidade do

¹³ Condição de visão na qual há desconforto ou redução da capacidade de distinguir detalhes ou objetos, devidos a uma distribuição desfavorável das luminâncias, ou a contraste excessivo. (ABNT, 1991).

ambiente. É o tipo de iluminação que será tratado nesta pesquisa, devido ao tipo de abertura presente na tipologia de estudo.

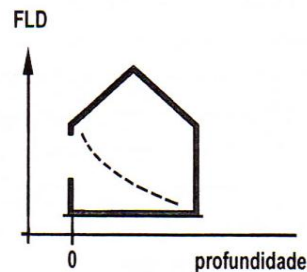


Figura 15: Relação FLD e profundidade do ambiente.
Fonte: YANNAS e CORBELLA, 2003.

Assim, para obter uma boa qualidade no projeto de iluminação, é importante se considerar a obstrução da entrada de radiação solar direta, evitar o ofuscamento e contrastes (causados por sombreamentos), ao mesmo tempo que combinar a iluminação artificial com a natural, considerando o consumo de energia elétrica (escolha de potência, tipo e duração das lâmpadas) e ter em vista os aspectos psicológicos e percepções dos usuários, tais como uma vista agradável, percepção das horas e do clima externo, um espaço interno confortável, entre outros.

De acordo com Albuquerque e Amorim (2012), no Brasil, ainda estão em desenvolvimento estudos que indiquem boas práticas de projeto em iluminação natural para os arquitetos e projetistas, ainda que se conheça a importância desse elemento no conforto dos usuários e a necessidade de se criar edificações mais eficientes. Segundo as autoras, há uma certa falta de conhecimento em relação às variáveis arquitetônicas que podem influenciar o desempenho da iluminação natural, tais como a profundidade máxima do ambiente para que ele seja iluminado adequadamente com luz natural e qual o impacto das proteções solares na profundidade alcançada pela luz natural.

A figura 16 resume algumas referências internacionais relativas ao limite da profundidade do ambiente em relação à altura da verga da janela para garantir iluminação natural (ALBUQUERQUE e AMORIM, 2012).

Indicações gerais da literatura internacional sobre iluminação natural	Referência
A luz natural em um edifício será significativa somente em cerca de 2 vezes o pé-direito de uma fachada envidraçada.	A Green Vitruvius (COFAIGH <i>et al.</i> , 1999, p. 72)
A profundidade máxima da área com iluminação natural corresponde a 2,5 vezes a diferença entre a verga da janela e a altura do plano de trabalho.	DIN V 18599: 4 (DEUTSCHES..., 2005)
Manter a profundidade dos ambientes entre 1,5 e 2 vezes a altura da verga da janela para níveis adequados de iluminação e boa distribuição da luz.	Tips for Daylighting (O'CONNOR <i>et al.</i> , 1997)
Ambientes com profundidade de 1,5 vez a altura da verga da janela permitem que a luz do sol gere níveis adequados de iluminação e boa distribuição da luz.	Daylighting Guide for Canadian Commercial Buildings (ENERMODAL..., 2002, p. 23)
Há uma relação direta entre a altura da verga da janela e a profundidade de penetração da luz natural. Uma iluminação adequada normalmente penetra 1,5 vez a altura da verga da janela, podendo penetrar em até 2 vezes considerando-se raios solares diretos.	Daylighting Guide for Buildings (ROBERTSON, 2005, p. 4)
Para evitar grandes variações entre níveis de iluminância (maiores que 25:1), a distância da parede da janela à parede interna deveria ser limitada a 2 vezes a altura da verga da janela com vidros incolores.	IESNA Lighting Handbook (IESNA, 2000, p. 8-24)

Figura 16: Resumo das indicações na literatura internacional sobre o limite da profundidade do ambiente em relação à altura da verga da janela.

Fonte: Adaptado de REINHART (2005) apud ALBUQUERQUE e AMORIM, 2012.

Segundo Reinhart (2005) apud Albuquerque e Amorim (2012), tais indicações sobre a profundidade dos ambientes são utilizadas por projetistas em geral, ainda que não garantam exatamente o quanto de iluminação será alcançado e não possuem justificativas com base em pesquisas para os valores que indicam. Mesmo assim, por serem valores simplificados, que não necessitam de cálculos, são parâmetros de relevância para o projeto, uma vez que estabelecem relações entre as proporções do ambiente e a área de janela.

A penetração controlada da luz do dia deve ser maximizada, de maneira que seja empregada na maior parte do edifício. Quando for necessário o uso da iluminação artificial, é preciso ter o cuidado de se escolher lâmpadas eficientes, como as fluorescentes compactas e/ou sistemas de sensores de luz do dia e dispositivos de redução automática (*dimmers*), como formas de se controlar os ganhos de calor internos (GRATIA e HERDE, 2003).

Em relação à largura da sala, Gratia e Herde (2003) afirmam que a luz proveniente diretamente do céu e das reflexões sobre as superfícies externas entra na sala de forma significativa apenas com uma distância equivalente ao dobro da altura do topo da janela em relação ao solo. Assim, os níveis de iluminação tendem a se reduzir em direção ao fundo da sala quanto maior for a profundidade da mesma, como pode ser visto na figura 17.

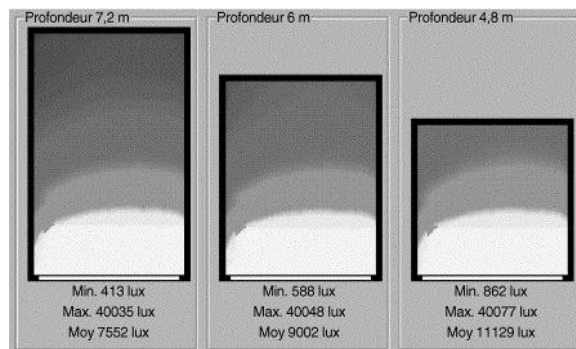


Figura 17: Influência da largura da sala, 15 de Março, céu claro, a partir da orientação da tarde, no sul.
Fonte: Gratia e Herde, 2003.

Através do céu encoberto, a maior parte da luz vem do alto da abóbada celeste, o que significa que as superfícies horizontais recebem uma maior quantidade de luz que as verticais. O piso e os móveis se constituem como superfícies planas muito iluminadas quando estão próximos às aberturas. Por conta disso, qualquer variação na fotometria das superfícies poderá gerar efeitos significativos sobre a distribuição da iluminação no ambiente interno.

No trabalho de Gratia e Herde (2003), foram feitas simulações com o programa TAS para saber qual é a orientação a ser privilegiada. Foram estudados dois tipos de aberturas na fachada, conforme apresentado na figura 19.

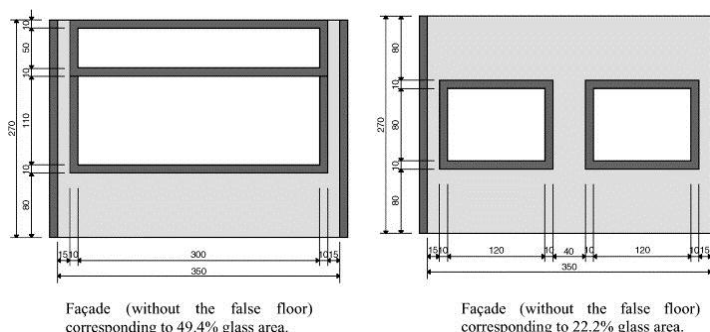


Figura 18: Desenho da fachada.
Fonte: Gratia e Herde, 2003.

Como resultado do estudo, foi obtido que a orientação do edifício norte-sul apresentou melhor desempenho do que a leste-oeste, ainda que se pudesse pensar que, durante a manhã, a iluminação natural advinda de grandes superfícies de vidro localizadas à leste poderia diminuir a necessidade de aquecimento nesse período, sendo esse o momento em que o edifício mais precisa disso.

Neste trabalho, após simulações realizadas em dois edifícios para a análise de aspectos como ganhos de cargas térmicas, a influência da ventilação e iluminação natural, foram geradas recomendações para o clima estudado, tais como isolar o edifício e ter boa estanqueidade do ar, limitar e controlar os ganhos internos, ter uma boa escolha da área de janelas e orientação, promover ventilação adequada e inércia térmica.

O estudo de Rocha e Pereira (2011) foi feito para verificar a eficiência energética de uma sala de escritórios (figura 19) na cidade de Florianópolis (SC). Foi considerada uma fachada envidraçada voltada para Norte, com a transmitância solar do vidro equivalente a 87%. O entorno não foi considerado. As refletâncias internas dos ambientes são 70% para teto, 50% para as paredes e 20% para o piso.

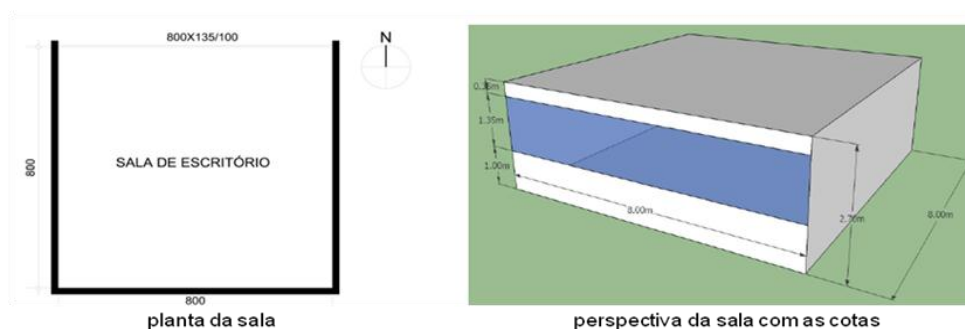


Figura 19: Planta da sala e perspectiva com cotas.

Fonte: Adaptado de Rocha e Pereira, 2011.

Os equipamentos selecionados foram lâmpadas, computadores e aparelho de ar condicionado (um aparelho de janela que opera durante o horário de uso da edificação para manter a temperatura interna entre 18° e 24°C durante todo o ano).

Em relação ao sistema de iluminação artificial, foram propostas luminárias de embutir de alta eficiência e aletas metálicas; iluminância de projeto com valor de 500 lux (segundo NBR 5413); e o período de simulação das 8h às 18h com ocupação de 12 pessoas, o que equivale a uma média de taxa de ocupação de 18m² por pessoa.

Foi criada uma malha de pontos do plano de trabalho a 75 cm do chão e os pontos se distanciavam de 133 cm entre si e 67 cm da parede.

Em relação aos sistemas de controle, foram considerados, conforme as figuras 20 e 21.

<u>Controle de iluminação</u>	<u>Características</u>
Manual on/off próximo a porta	Os próprios usuários fazem o controle do sistema de iluminação
Sensor de ocupação off	Lâmpadas desligam após 10 min de o ambiente permanecer desocupado e podem ser somente reativadas manualmente
Sensor de ocupação on/off	Lâmpadas desligam após 5 min de o ambiente permanecer desocupado e são ligadas com a ocupação novamente
Sistema dimerizado controlado por um fotosensor	Fotocélulas dimerizam o nível de iluminação das lâmpadas até o limiar de iluminância adequado no plano de trabalho
Combinação de sensor de ocupação e sistema dimerizador	Fotocélulas dimerizam o nível de iluminação das lâmpadas e caso não haja ocupação, as lâmpadas são desligadas e só reativadas manualmente
Combinação de sensor de ocupação e sistema dimerizador	Fotocélulas dimerizam o nível de iluminação das lâmpadas e caso não haja ocupação, as lâmpadas são desligadas e só reativadas com o retorno da ocupação

Figura 20: Sistemas de controle de iluminação artificial.

Fonte: Rocha e Pereira et al, 2011.

<u>Controle de venezianas</u>	<u>Características</u>
Manual	Corresponde a um sistema de venezianas que leva em consideração os padrões de comportamento do usuário quanto ao brilho
Automática	As venezianas são totalmente abaixadas para evitar brilho e luz solar direta acima de 50W/m ² no plano de trabalho
Sem venezianas	Característica do edifício sem venezianas

Figura 21: Sistemas de controle de venezianas.
Fonte: Rocha e Pereira, 2011.

Em relação aos tipos de usuários, foi criada uma ocupação mista, com usuários ativos e passivos, sendo que o primeiro utiliza a iluminação artificial de acordo com as condições de iluminação natural do ambiente, enquanto que o segundo desconsidera qualquer tipo de condicionamento natural e mantém a iluminação artificial acionada durante todo o dia.

A sala é ocupada durante o dia todo, sendo que na chegada, de manhã, foi considerado um tempo de 15min para acomodação, um intervalo de 15min no meio do período e ausência no período do almoço (das 12 às 14h). Na parte da tarde acontece o mesmo, tendo períodos de ocupação plena, intervalo de 15min no meio da tarde e acomodação de 15min na saída (figura 22).

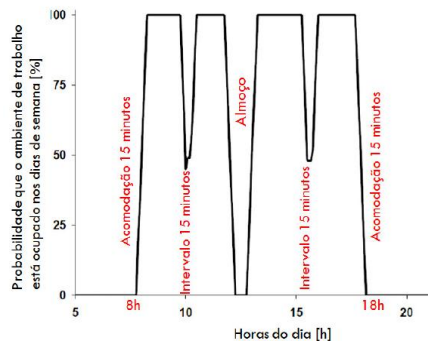


Figura 22: Gráfico de ocupação versus horas do dia.
Fonte: Rocha e Pereira, 2011.

A partir de tais parâmetros foram obtidos alguns resultados. No caso de se propor uma ocupação mista (usuários ativos e passivos), observou-se que o maior aproveitamento da luz natural foi alcançado pelos usuários ativos, os quais abriam as venezianas pela manhã, ao contrário dos usuários passivos, que desconsideravam qualquer mudança no ambiente, e mantinham as venezianas fechadas e a luz artificial acionada.

O relatório extraído do programa *Daysim* (dados horários de ocupação, do fator de potência usada e do estado das venezianas) foi introduzido no *EnergyPlus* e os dados de saída definidos para as simulações foram cargas de aquecimento e de resfriamento; e a potência de iluminação elétrica.

Consumo de cada sistema (KWh/m²/ano)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	NATURAL E+ noblinds	Menos eficiente noblinds
ILUMINAÇÃO	18,31	15,51	15,07	6,33	5,5	5,38	2,91	25,55
AQUECIMENTO	1,59	1,62	1,63	1,73	1,74	1,74	1,85	1,51
RESFRIAMENTO	217,5	214,74	214,3	205,31	204,47	204,36	201,25	218,2

cortinas abertas

Consumo energético para os modelos configurados com sistema manual de venezianas (M) combinado a todos os tipos de controle de iluminação (1 a 6) e os modelos simulados somente com controle manual de venezianas e Sistema menos eficiente)

Consumo de cada sistema (KWh/m²/ano)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	NATURAL E+(blinds)	Menos eficiente (blinds)
ILUMINAÇÃO	18,74	15,51	15,07	15,39	12,77	12,43	4,28	25,55
AQUECIMENTO	3,42	3,48	3,49	3,48	3,53	3,54	3,54	3,22
RESFRIAMENTO	186,33	183,15	182,72	182,95	180,38	180,04	178,46	186,66

cortinas fechadas

Figura 23: Consumo energético de acordo com cada sistema de controle de venezianas (estático ou manual).

Fonte: Adaptado de Rocha e Pereira, 2011.

Pela figura 23 pode-se verificar que com a introdução de sistemas dimerizáveis no modelo de cortinas abertas houve quase 80% de economia de energia em iluminação, bem como a redução na carga de resfriamento (pela redução da potência da lâmpada).

Outra questão avaliada foi em relação à influência nos sistemas manuais de controle de venezianas e iluminação exercido pelo comportamento dos usuários: o ambiente ocupado por usuários passivos obteve um consumo duas vezes maior que o ambiente ocupado por usuários ativos (figura 24).



Figura 24: Consumo de iluminação para usuários ativo e passivo.

Fonte: Rocha e Pereira, 2011.

Dessa forma, é importante considerar que usuários reais de um edifício podem apresentar comportamentos de consumo muito diferentes dos modelos apresentados neste estudo. Ao mesmo tempo, tal resultado demonstrou que a presença do usuário pode influenciar de forma positiva (ou negativa) no consumo de energia elétrica do edifício, independente do sistema utilizado.

Tais conceitos e estudos realizados reforçam a importância na utilização da iluminação natural nos projetos arquitetônicos e como tal elemento deve ser inserido de maneira planejada, uma vez que assim sendo feito, poderão haver grandes ganhos para o conforto térmico no edifício, ao mesmo tempo que poderá contribuir de maneira significativa na redução do consumo de energia elétrica.

3. METODOLOGIA

A metodologia está dividida em duas etapas: a primeira, experimental, consiste em um complemento à pesquisa por meio de medições realizadas em quatro salas da área administrativa do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, em São Carlos. A segunda etapa consiste em caracterizações dos climas e do modelo de edifício a ser estudado, bem como simulações computacionais termo energéticas e de iluminação natural, realizadas nos programas *EnergyPlus* e *Daysim*, respectivamente.

3.1. Medições Realizadas nas Salas do IAU

Como complemento ao estudo dos efeitos da temperatura no ambiente de escritório, foram feitas medições de temperatura nas salas administrativas do IAU/USP, no período de janeiro a março de 2012. Tais medições possibilitaram análises (que serão apresentadas no item 3.4) a respeito das temperaturas de acionamento dos equipamentos condicionadores de ar, dados que foram utilizados nas simulações computacionais.

3.2. Caracterização dos Climas a serem estudados

Os climas apresentados a seguir referem-se aos selecionados para o estudo dos edifícios de escritórios. As cidades escolhidas foram São Carlos (SP) e Natal (RN) pela diferença acentuada entre suas características, haja vista que São Carlos localiza-se no Sudeste e Natal localiza-se no nordeste do país. O detalhamento dos climas será apresentado no item 4.5.

Para a apresentação das características de cada cidade, os arquivos climáticos em formato "epw" (*EnergyPlus Weather File*) foram inseridos no programa *Climate Consultant* (LIGGETT, 2012) para obtenção dos dados de temperatura e umidade, os quais foram plotados na Carta Bioclimática de Givoni¹⁴, para obtenção da zona de conforto em que estão inseridos, assim como as estratégias bioclimáticas referentes a cada local.

Arquivos climáticos são obtidos em estações meteorológicas e precisam ser adaptados ao formato utilizado pelos programas de simulação. Geralmente os arquivos deste formato são montados a partir de uma série de dados anuais (são observados os anos em que se atingem as mais extremas temperaturas e eles são eliminados, para assim se obter um ano de referência) (RAMOS, 2008).

Alguma das variáveis contidas neste arquivo são: temperatura de bulbo seco; temperatura de ponto de orvalho; temperatura de solo; velocidade do vento; direção do

¹⁴ Baruch Givoni em 1969 criou uma carta bioclimática que se baseia em temperaturas internas do edifício, propondo estratégias construtivas para adequação da arquitetura ao clima (GIVONI, 1976).

vento; pressão atmosférica; quantidade de nuvens; tipo de nuvens; altura das nuvens; e radiação solar (CARLO, 2005).

A maioria dos programas computacionais para a análise termo energética de edificações utiliza os arquivos climáticos para demonstrar a influência do ambiente externo sobre o edifício. Alguns programas utilizam estes dados para o cálculo da iluminação natural, tais como os programas *EnergyPlus* e *Daysim/Radiance*, que serão utilizados na presente pesquisa.

Os arquivos climáticos utilizados nessa pesquisa foram desenvolvidos por Roriz (2012). Com isso, através dos dados obtidos nos arquivos climáticos é possível se caracterizar os climas de forma clara, contribuindo assim com o estudo da eficiência energética, uma vez que o clima apresenta-se como elemento fundamental nos aspectos bioclimáticos do edifício.

3.3. Simulação Computacional

Os programas de simulação computacional possibilitam a avaliação do desempenho térmico e energético de edificações para diferentes parâmetros de projeto, tais como o desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistemas de iluminação ou sistemas de condicionamento de ar. Através desses programas é possível se estimar o consumo de energia, o seu custo e o impacto gerado pelo projeto antes de sua execução (MENDES et al, 2005), permitindo assim a realização de uma análise aprofundada e confiável do desempenho térmico de um edifício quando sujeito à exposição dinâmica de um clima particular.

Para as simulações da presente pesquisa foram utilizados dois programas computacionais, a saber: *EnergyPlus* (EERE, 2012)¹⁵ e o *Daysim* (NRCC,2010)¹⁶.

O programa computacional *EnergyPlus* (EERE, 2012), desenvolvido para o Departamento de Energia Norte-Americano (DOE), é uma das ferramentas de simulação escolhida para a pesquisa. O programa estima o consumo de energia, tendo como base o clima e a caracterização do edifício, calculando as trocas térmicas entre o edifício e o exterior. Para isso, o programa considera a geometria, os componentes construtivos, os padrões de uso e ocupação, as cargas térmicas instaladas, e o sistema de condicionamento de ar como elementos para o cálculo.

Por meio de uma estrutura composta por um operador da simulação, módulo de balanço de calor e módulo de simulação dos sistemas da edificação o programa também permite a solicitação de relatórios com dados estimados durante o processo de simulação,

¹⁵ Disponível em: < <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>

¹⁶ Disponível em: < <http://www.daysim.com/>>

incluindo temperatura interna de cada zona térmica, consumo de energia e carga térmica retirada pelo sistema de condicionamento de ar (RAMOS, 2008).

O programa possui também um módulo para o cálculo da ventilação, que será utilizado na presente pesquisa, denominado *AirflowNetwork*. De acordo com Lamberts et al (2008), o *EnergyPlus* calcula o fluxo de ar entre zonas e o exterior, através de frestas e janelas. O módulo é dividido em duas partes: uma para ventilação natural e outra para ventilação forçada. No módulo relacionado à ventilação natural são determinados os links (entradas) do fluxo de ar, as características do entorno da edificação, as condições de abertura das janelas e portas e as condições de ventilação. O algoritmo permite que sejam criadas *schedules* de controle, de disponibilidade de ventilação, entre outras.

O programa ainda pode calcular automaticamente, porém de modo simplificado, os coeficientes de pressão (CPs¹⁷), gerando valores médios para cada fachada, mas para isso é necessário que o edifício possua uma geometria retangular, porque o *EnergyPlus* só possui esse tipo de geometria nos bancos de dados.

Dessa forma, por meio de uma série de parâmetros é possível calcular a eficiência energética do edifício. Um dado importante a ser considerado é o de que o programa *EnergyPlus* também possui um módulo para o cálculo de iluminação natural, porém ele não é tão confiável quanto o programa *Daysim*. Segundo Ramos e Ghisi (2010), o programa *EnergyPlus* superestima valores de iluminância dentro do ambiente, enquanto o programa *Daysim* apresenta um gradiente dessas iluminâncias de acordo com cada ponto da malha no plano de trabalho, o que o aproxima da realidade, sendo assim, mais preciso.

Para a versão 7.2 do *EnergyPlus* (EERE, 2012) houveram atualizações no módulo de iluminação natural, com novas funcionalidades como o *DElight*, que é apresentado como uma versão alternativa ao já existente *Daylighting model*. Esse módulo garante uma maior integração entre iluminação natural e artificial, por calcular as iluminâncias internas da sala e permitir a redução das luminárias elétricas quando a taxa de iluminância for atingida apenas com a iluminação natural. Outra funcionalidade é o *Output:IlluminanceMap*, o qual permite se criar um mapa de até 2500 pontos de valores de iluminância. No entanto, o módulo de cálculo ainda é o mesmo, e o próprio manual do programa mostra que ele ainda apresenta erros quando se tem pontos muito próximos às superfícies (janelas, paredes, portas, etc), reafirmando o que Ramos e Ghisi (2010) constataram sobre a confiabilidade no módulo de iluminação natural do programa.

Dessa forma, a outra ferramenta selecionada para ser utilizada na pesquisa é o programa *Daysim/Radiance* (NRCC, 2010). Ele foi desenvolvido pelo *National Research*

¹⁷ Coeficientes de Pressão são números adimensionais que indicam "as relações entre as pressões em diferentes pontos das superfícies externas de um sólido. Cada ponto da edificação que sofre pressão do vento possui seus próprios valores de CP para cada direção de vento. Os valores de CP dependem da forma da edificação, da direção do vento e da influência de obstruções como edificações vizinhas, vegetação e características locais do terreno" (INMETRO, 2010).

Council Canada e pelo Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, na Alemanha, com a finalidade de calcular as iluminâncias para o período de um ano, de forma rápida e independente do tipo de céu (REINHART, 2006).

A simulação é realizada a partir do arquivo climático e de um modelo tridimensional do ambiente a ser analisado, onde são definidas as propriedades ópticas das superfícies e a malha de pontos onde serão medidas as iluminâncias.

Conforme fora supracitado, de acordo com Rocha e Pereira (2011), uma questão importante a ser considerada é o comportamento dos usuários, que podem ser definidos como ativos e passivos. Assim, a presença desses tipos de usuários podem tanto potencializar como podem diminuir a economia de energia alcançada pelo aproveitamento da iluminação natural.

Dessa forma, é importante salientar que o programa *Daysim* não calcula a eficiência energética do edifício estudado, pois é um programa específico de iluminação. Ele gera um relatório anual com os dados de iluminação que poderão ser importados para o programa *EnergyPlus*, onde será incorporado a outros parâmetros para o cálculo de eficiência energética da edificação.

3.4. Procedimento experimental

Neste item será apresentado o procedimento experimental da pesquisa – medições de temperatura interna e de acionamento dos condicionadores de ar e ventiladores - realizado nas salas administrativas do Instituto de Arquitetura e Urbanismo - IAU/USP (BRUGNERA; RORIZ; CHVATAL, 2013).

3.4.1. Medições salas IAU

Foram realizadas medições de temperatura em quatro salas de escritórios da área administrativa do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, em São Carlos, durante o período de janeiro a março de 2012. Das quatro salas analisadas, duas possuíam aparelhos condicionadores de ar e duas possuíam ventiladores. Os instrumentos utilizados para as medições foram cinco HOBOS (modelo HOB0 8, marca Onset), apresentado na figura 25.



Figura 25: Sensor do tipo HOBO.

As medições foram feitas em quatro etapas, totalizando 47 dias: 1ª) de 23/01/12 à 17/02/12 (26 dias); 2ª) de 24/02/12 à 01/03/12 (7 dias); 3ª) de 01/03/12 à 07/03/12 (7 dias); e 4ª) de 08/03/12 à 14/03/12 (7 dias).

Para cada sala foi distribuído um questionário aos funcionários, que marcavam a que horas ligavam e/ou desligavam os equipamentos (ventiladores e condicionadores de ar) e abriam e/ou fechavam as janelas e/ou as portas.

O primeiro período de medição (de 23/01/12 à 17/02/12) foi um procedimento piloto, os resultados foram obtidos em metade das salas apenas (uma com condicionador de ar e a outra com ventilador).

3.4.2. Temperatura Externa

Os dados de temperatura externa para o período de medições no IAU seriam obtidos em uma estação meteorológica localizada a pouca distância do IAU, no entanto, a estação sofreu manutenção, comprometendo assim os dados para esses períodos.

Dessa forma, foram obtidos dados de temperatura externa para a cidade de São Carlos, registrados de três em três horas para o período de medições no IAU, no Sistema de Coleta de Dados Ambientais (SINDA, 2013). De acordo com esses dados foram criadas médias horárias de temperatura para os quatro períodos de medições.

Para análise comparativa da temperatura interna em relação à externa foi utilizado um método apresentado por Roriz (2001), em que é criado um dia médio por meio da Equação 1, em que a temperatura do ar exterior corresponde ao momento h de acordo com:

$$TE_h = TE_{MIN} + K_t h (TE_{MAX} - TE_{MIN}) \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

TE_h = Temperatura do ar exterior no momento h (°C)

TE_{MAX} e TE_{MIN} = Médias mensais das temperaturas máximas e mínimas (°C)

$K_t h$ = Fator (entre 0 e 1) utilizado no cálculo da temperatura exterior no momento h :

Tabela 1: Valores horários do fator $K_t h$, correspondentes a um dia climático médio

hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
K_t	0,16	0,14	0,10	0,08	0,04	0,02	0,00	0,04	0,14	0,29	0,49	0,68
hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
K_t	0,16	0,14	0,10	0,08	0,04	0,02	0,00	0,04	0,14	0,29	0,49	0,68

Fonte: Adaptado de Roriz (2001)

Dessa forma, a figura 26 apresenta as curvas de médias horárias das temperaturas externas que compreendem os quatro períodos de medições.

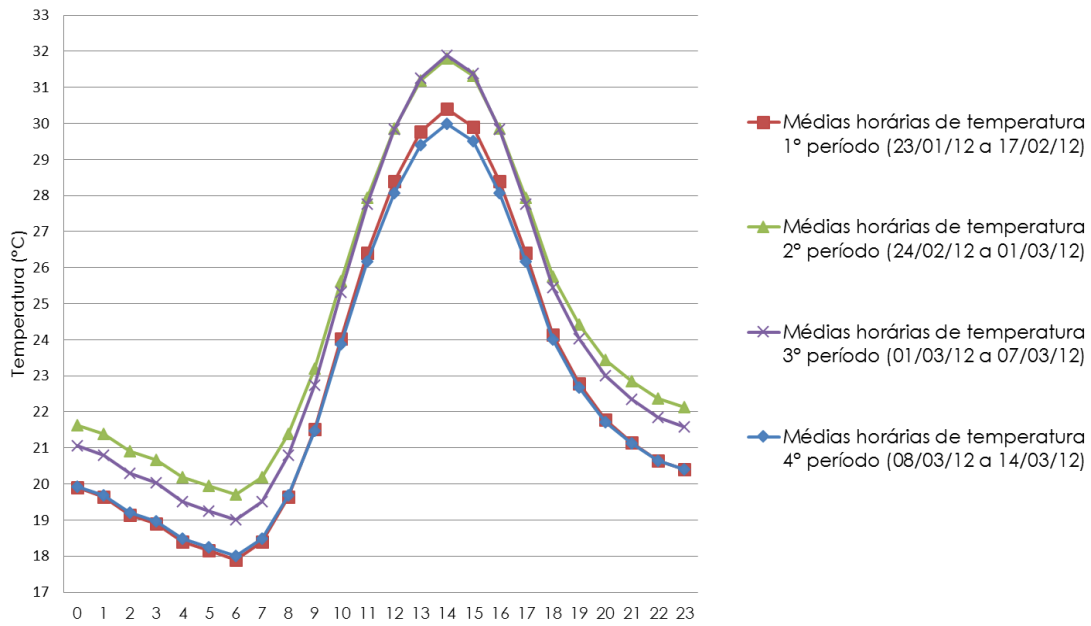


Figura 26: Médias horárias das temperaturas externas para o período de medições.

3.4.3. Salas analisadas pelo estudo

As salas 1 (figuras 27 e 28) e 2 (figuras 29 e 30) apresentam ventilação natural pelas janelas e portas e possuem a opção de uso de ventiladores do tipo pedestal. Tal equipamento pode apenas incrementar o fluxo de ar sobre as pessoas, não alterando assim a taxa de renovação de ar do ambiente.



Figura 27: Sala 1

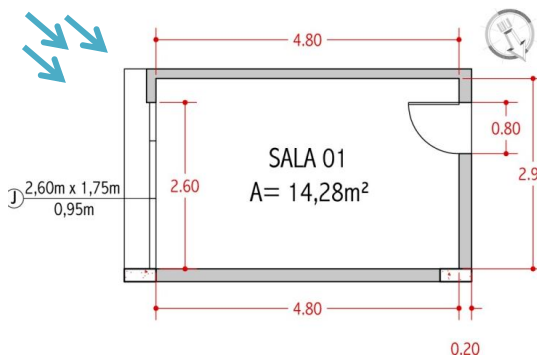


Figura 28: Planta da Sala 1



Figura 29: Sala 2

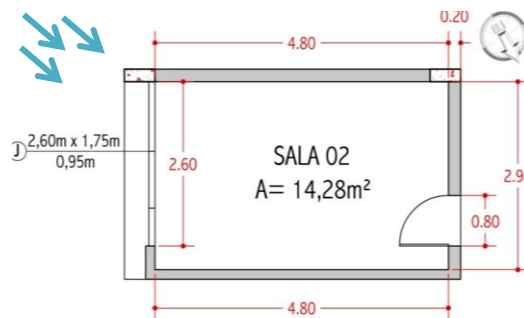


Figura 30: Planta da Sala 2

Ambas as salas possuem saída para um corredor interno do IAU, que é ventilado constantemente por uma abertura revestida por tela. As duas salas possuem a mesma

orientação em relação ao norte e mesma área, 14.28m². A sala 1 é ocupada por apenas uma pessoa e a sala 2 é ocupada por duas pessoas. A direção dos ventos predominantes em São Carlos é sudeste (LIGGETT, 2012) e é apresentado nas plantas de cada sala. As portas e janelas de ambas as salas permanecem abertas durante todo o período de ocupação.

As salas 3 (figuras 31 e 32) e 4 (figuras 33 e 34) apresentam as opções de obter a ventilação natural pelas janelas ou utilizar o condicionador de ar.



Figura 31: Foto da sala 3

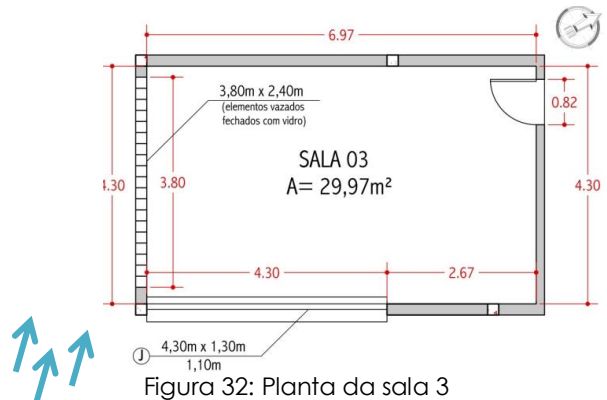


Figura 32: Planta da sala 3

A sala 3 mede 29.97m², é ocupada por três pessoas e possui um aparelho condicionador de ar instalado. Durante todo o período de ocupação as portas e janelas permanecem fechadas e a sala é voltada para um pátio coberto. Há uma parede de 9.12m² voltada à sul, revestida por elementos vazados (como pode ser visto na figura 31), mas são elementos vedados com vidro, não permitindo a ventilação por essa fachada. A fachada leste possui uma janela de correr de 5.59m² que é aberta para atendimento ao público durante o período da tarde apenas quando o ar condicionado não está ligado.



Figura 33: Fotos da sala 4, sendo (A) fachada sudoeste e (B) fachada nordeste.

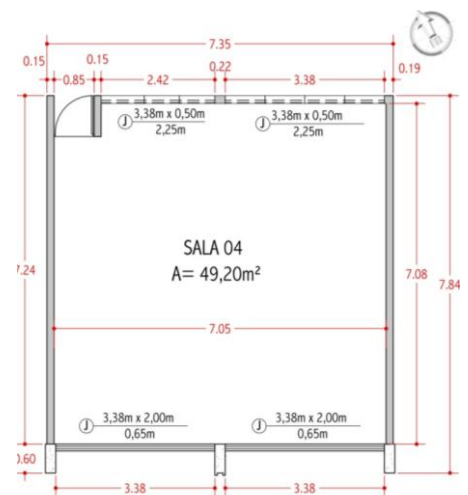


Figura 34: Planta da sala 4.

Já a sala 4, apresentada nas figuras 33 e 34, possui uma área de 49.20m², é ocupada por oito pessoas e possui dois aparelhos condicionadores de ar. As aberturas se localizam em paredes opostas, sendo duas janelas de correr na fachada sudoeste (medindo 6.76m² cada) e duas basculantes na fachada noroeste (1.21m² e 1.69m²). As janelas da fachada sudoeste são abertas apenas quando os condicionadores de ar não estão ligados e são voltadas a um jardim externo. Já as janelas da fachada noroeste permanecem fechadas e estão voltadas a um pátio interno descoberto.

3.4.4. Comparação das Temperaturas internas e externas

Foram feitas análises comparativas entre a média das temperaturas internas e externas, durante os quatro períodos de medições, nos meses de janeiro à março de 2012.

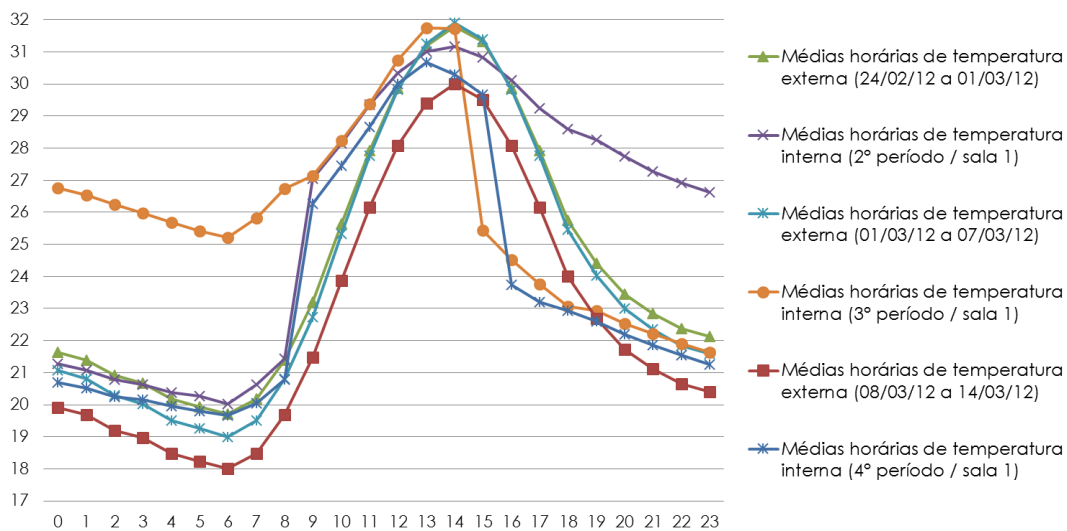


Figura 35: Médias horárias de temperaturas externas e internas na sala 1 (ventilador) nos quatro períodos de medição.

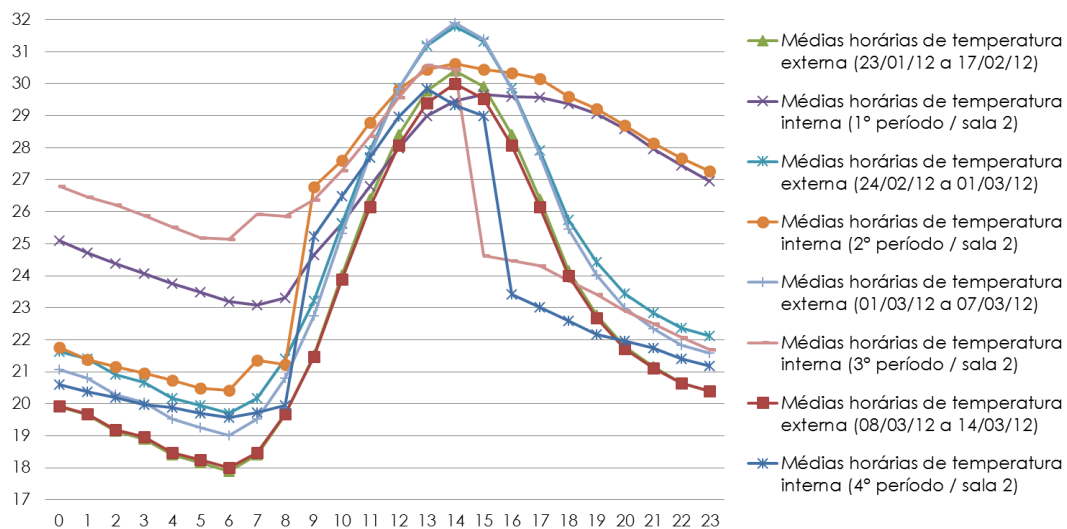


Figura 36: Médias horárias de temperaturas externas e internas na sala 2 (ventilador) nos quatro períodos de medição.

Como pode ser observado nas figuras 35 e 36, nas salas 1 e 2 (ventilador), a temperatura interna acompanha a tendência da temperatura externa, sendo evidenciada nos períodos de ocupação (entre 8h e 18h). Tal efeito pode ocorrer devido ao aumento da taxa de renovação de ar.

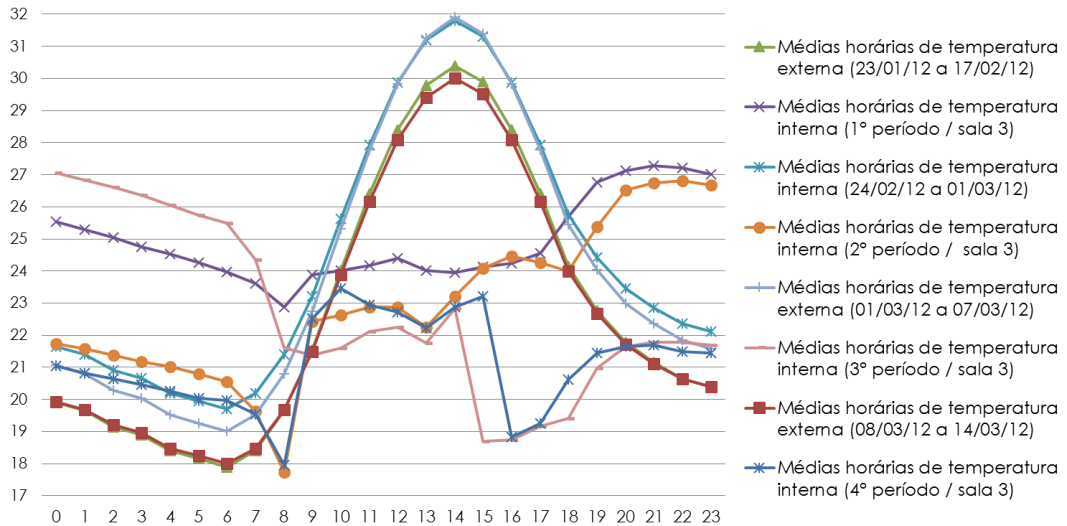


Figura 37: Médias horárias de temperaturas externas e internas na sala 3 (condicionador de ar) nos quatro períodos de medição.

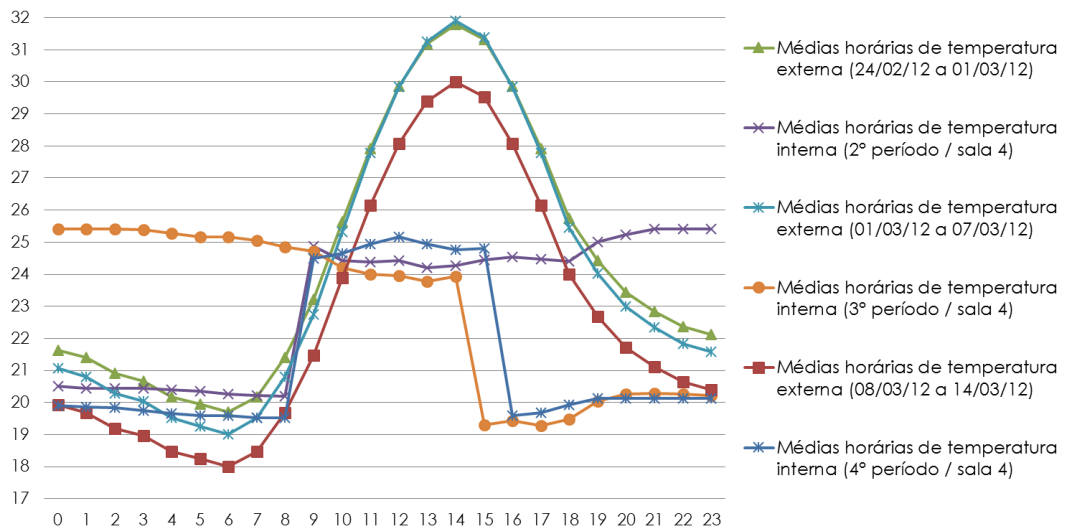


Figura 38: Médias horárias de temperaturas externas e internas na sala 4 (condicionador de ar) nos quatro períodos de medição.

Já as salas 3 e 4 (figuras 37 e 38), que possuem aparelhos condicionadores de ar, é possível observar que a temperatura interna mantém-se estável em boa parte do período de ocupação, sendo bem reduzida em relação à temperatura externa. As grandes alterações de forma instantânea denotam o momento de acionamento e desligamento dos equipamentos acionadores de ar e ventiladores, dado que também foi confirmado pelos questionários.

3.4.5 Análise das Temperaturas de setpoint

Foi feita uma análise estatística sobre os dados de acionamento dos aparelhos condicionadores de ar e ventiladores e apresentada sob a forma de histogramas, em que se pode notar as temperaturas de acionamento e desligamento dos aparelhos condicionadores de ar e ventiladores.

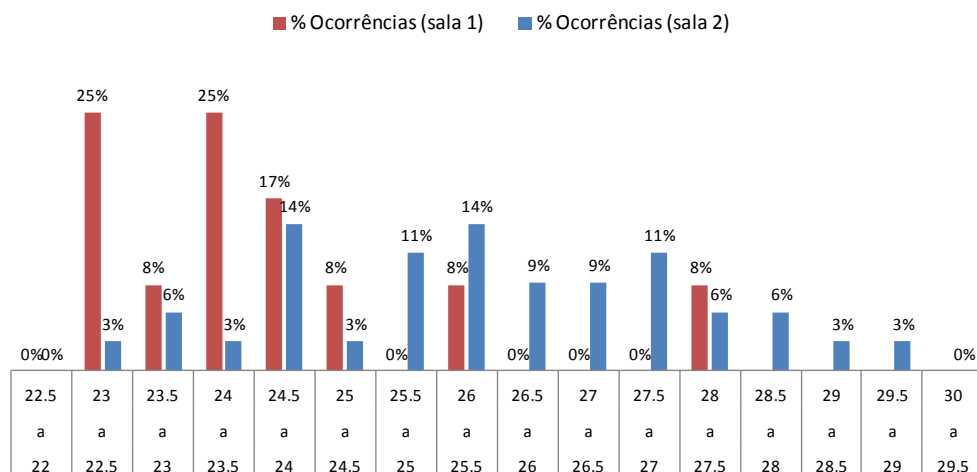


Figura 39: Histogramas demonstrando a frequência de ligar o ventilador em relação à temperatura nas salas 1 e 2.

O histograma apresentado na figura 39 denota que os ventiladores são ligados em sua maioria (67%) entre 22.5 e 24,5°C na sala 1, enquanto que na sala 2 essa tendência se reflete entre as temperaturas de 24 e 27.5°C (71%). Essa diferença de temperaturas de acionamento de ventiladores pode estar atribuída a preferências pessoais dos ocupantes. Diante de tais valores, chegou-se a uma temperatura média de acionamento dos ventiladores de 24.6°C.

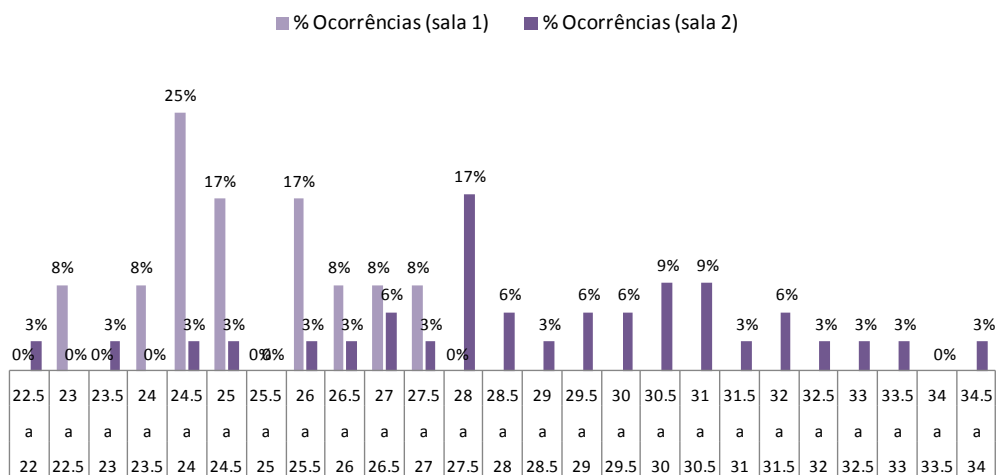


Figura 40: Histograma demonstrando a frequência desligar o ventilador em relação à temperatura nas salas 1 e 2.

Já o histograma apresentado na figura 40 demonstra a temperatura de desligamento dos ventiladores, que fica em torno de 24 a 26°C (59%) na sala 1, enquanto que na sala 2 fica

em torno de 28 a 30°C (47%), o que aponta uma média de 27°C. No entanto, foi feita uma análise em relação aos horários de desligamento, a fim de se obter uma temperatura padrão, porém foi observado que há uma forte relação entre o desligamento dos aparelhos e os horários de fim de expediente, já que o horário mais frequente era por volta das 16h.

Já em relação às salas com condicionador de ar, o comportamento das temperaturas de *setpoint* apresenta-se de forma diferente, como pode ser visto nos histogramas apresentados pelas figuras 41 e 42.

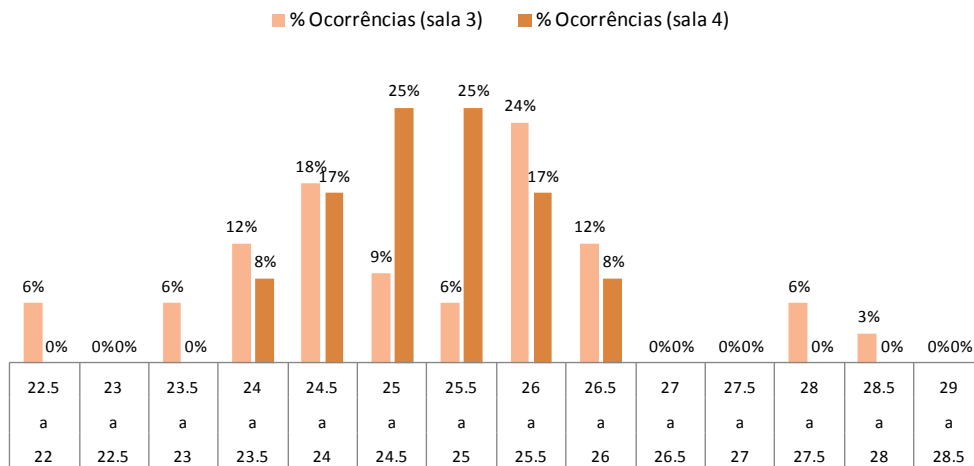


Figura 41: Histograma demonstrando a frequência de ligar o condicionador de ar em relação à temperatura nas salas 3 e 4.

A tendência apresentada pelo histograma da figura 42 mostra que a temperatura de *setpoint*, de acionamento dos condicionadores de ar, fica em torno de 24 e 26°C tanto para a sala 3 (69%), quanto para a sala 4 (84%). Tais valores apontam uma média de 25°C para acionamento dos condicionadores de ar, assemelhando-se aos valores analisados no acionamento dos ventiladores.

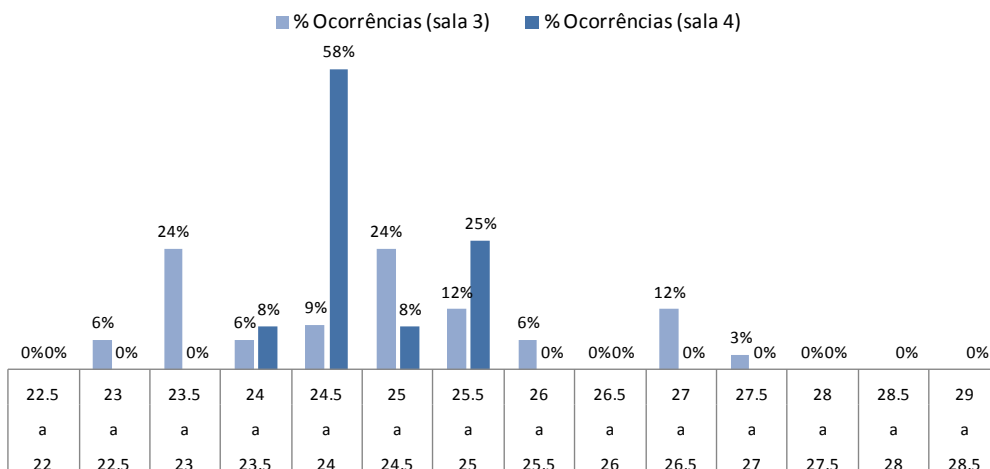


Figura 42: Histograma demonstrando a frequência de desligar o condicionador de ar em relação à temperatura nas salas 3 e 4.

Em relação às temperaturas de desligamento dos aparelhos condicionadores de ar (figura 43), tem-se que na sala 3 a faixa de temperatura fica em torno de 23 a 25°C (75%), enquanto que na sala 4 a faixa fica em torno de 24 a 25.5°C (91%). Tais valores apontam uma média de temperatura em torno de 24.5°C para o desligamento dos condicionadores de ar.

Também foi feita uma análise considerando os horários de desligamento dos aparelhos, que denotou claramente os horários das 12h e das 17h30, reforçando a relação do desligamento dos aparelhos com os padrões horários de ocupação das salas.

Assim, de acordo com a análise dos histogramas é possível notar que as temperaturas de acionamento dos ventiladores e dos aparelhos condicionadores de ar ocorre por volta dos 25°C. Já em relação às temperaturas de desligamento houve uma diferença, pois nas salas com ventiladores se apresentou em torno de 27°C e nas com condicionadores de ar ficou em torno de 24.5°C. Tal diferença é afirmada por conta dos padrões horários de ocupação das salas, denotando a forte relação entre os horários de desligamento e o fim do expediente.

3.4.6. Análise comparativa das temperaturas de *setpoint* com a ASHRAE 55/2004

A partir das análises das temperaturas de *setpoint* dos aparelhos condicionadores de ar e ventiladores, obtidas pelas medições nas salas do IAU, foi feita uma comparação com as faixas de conforto propostas pela norma ASHRAE 55/2004.

Desse modo, os pontos que representam as temperaturas de *setpoint* de ligar e desligar os aparelhos e as temperaturas médias internas de cada sala para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2012 foram plotados no gráfico da faixa de conforto (figura 43).

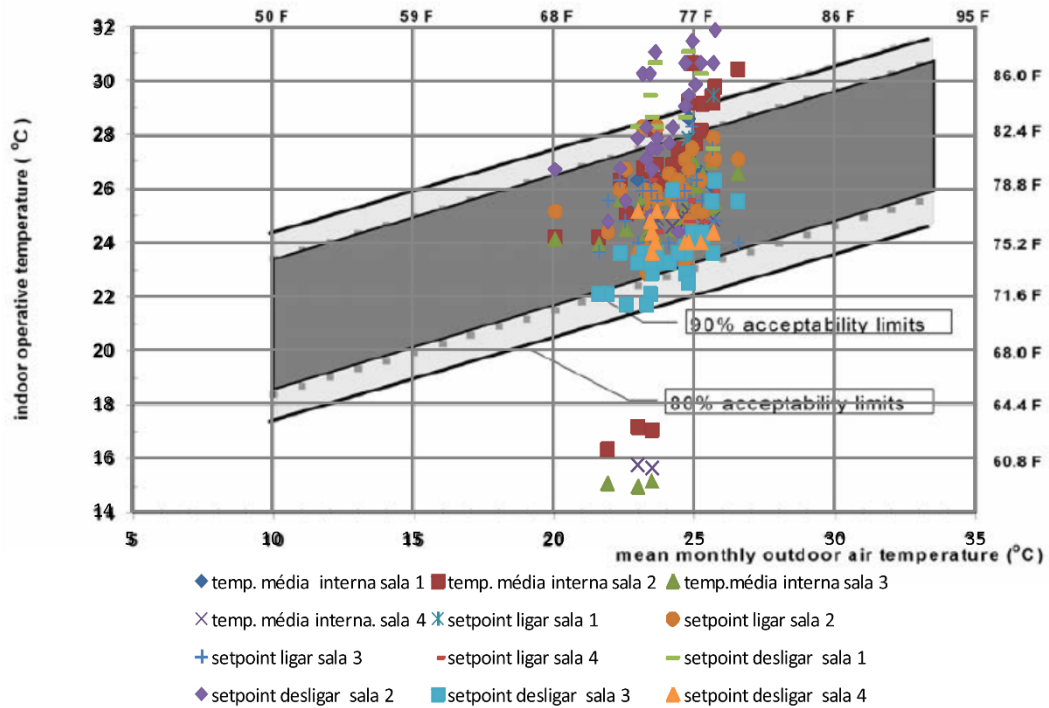


Figura 43: Gráfico comparativo da faixa de neutralidade térmica prevista pela ASHRAE 55/2004 com as temperaturas de *setpoint* dos equipamentos nas quatro salas.

A figura 43 demonstra a forte tendência de as temperaturas de acionamento se encontrarem dentro da faixa de conforto, o que não ocorre com as temperaturas de desligamento, que chegam a extrapolar a faixa, principalmente as salas 1 e 2. A partir dessa análise é possível verificar que os usuários não deixam a temperatura aumentar de modo que cause total desconforto, ao contrário, eles se antecipam e ligam os aparelhos a partir do momento que sentem a temperatura aumentar. Tal fato pode ocorrer por conta de os usuários terem pleno domínio sob os equipamentos, podendo indicar também uma menor tolerância dos usuários de condicionadores de ar às variações climáticas.

3.4.7. Análise dos resultados

Neste item serão apresentados os primeiros resultados da pesquisa, tais como a análise comparativa das temperaturas de *setpoint* obtidas pelas medições no IAU com a norma ASHRAE 55/2004. Também serão apresentados os resultados da simulação de balanço energético, da ventilação natural e do modelo apenas com ar condicionado.

3.5. Caracterização dos climas

Serão descritos a seguir os climas a serem utilizados nas simulações computacionais.

3.5.1. São Carlos (SP)

São Carlos está localizada na região sudeste do Brasil e possui latitude $-22^{\circ} 02'$ e longitude $-47^{\circ} 89'$, com 863m de altitude.

A figura 44 apresenta os dados de temperatura anual obtidos pelo software *Climate Consultante* (LIGGETT, 2012). É possível notar que São Carlos possui temperaturas que variam de 0°C a 22°C em 50% do ano, principalmente entre os meses de abril a agosto, ficando entre 24°C a 38°C em 22% do ano, correspondendo aos meses de outubro a dezembro.

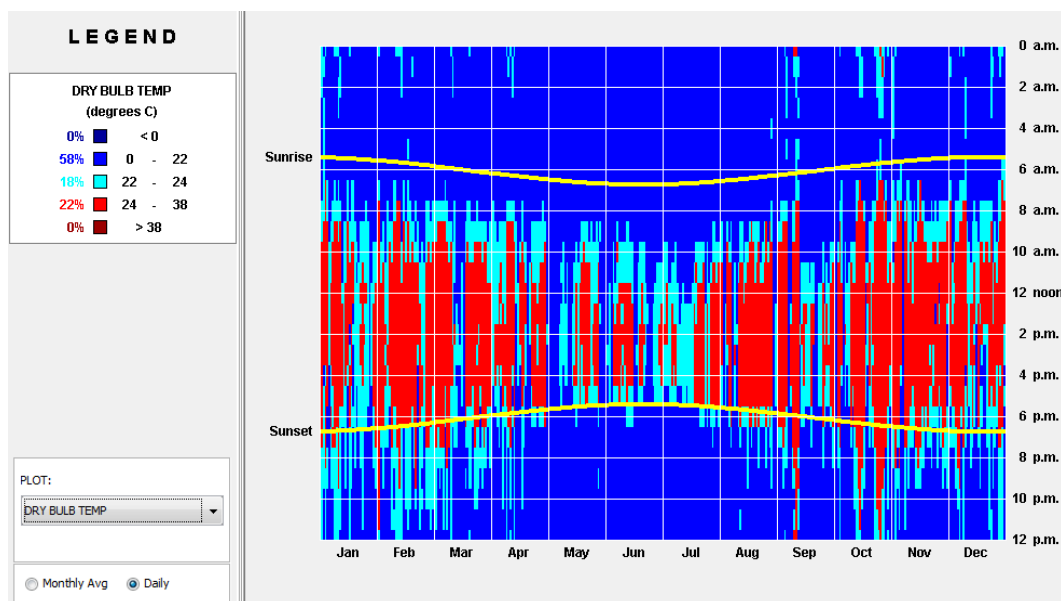


Figura 44: Variação da temperatura ao longo do ano para a cidade de São Carlos (SP).
Fonte: Adaptado de *Climate Consultante* (LIGGETT, 2012)

A tabela 2 apresenta as temperaturas mensais ao longo do ano para a cidade de São Carlos. Os dados foram obtidos por meio do arquivo climático inserido no programa *Climate Consultante* (LIGGETT, 2012).

Tabela 2: Temperatura mensal ao longo do ano para a cidade de São Carlos (SP)

MÊS	TBS ($^{\circ}\text{C}$)	UMIDADE (%)	VELOCIDADE DOS VENTOS (m/s)
Janeiro	21	79	2
Fevereiro	22	77	2
Março	21	75	2
Abril	20	78	1
Mai	17	73	1
Junho	17	74	2
Julho	17	54	2
Agosto	19	59	2
Setembro	19	59	2
Outubro	22	67	2
Novembro	22	70	2
Dezembro	21	73	2

Fonte: Adaptado de *Climate Consultante* (LIGGETT, 2012).

Em relação aos ventos, tem-se que a direção predominante é sudeste e varia entre 2m/s a 4 m/s. A umidade relativa do ar, na maior parte do ano situa-se entre 30 e 70%. A rosa dos ventos gerada para a cidade de São Carlos apresenta tais dados, como pode ser visto na figura 45.

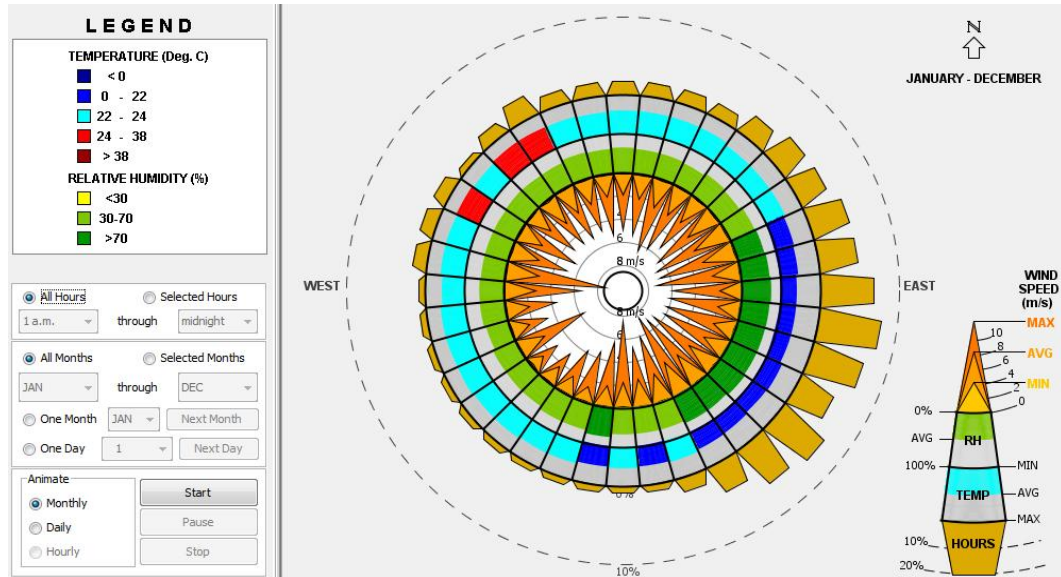


Figura 45: Rosa dos ventos para a cidade de São Carlos (SP).
 Fonte: Adaptado de *Climate Consultant* (LIGGETT, 2012)

No diagrama bioclimático de Givoni para países em desenvolvimento (figura 46) foram inseridos os dados do arquivo epw da cidade de São Carlos (MARQUES, 2013), demonstrando que a cidade está em boa parte do ano localizada dentro da zona de conforto térmico.

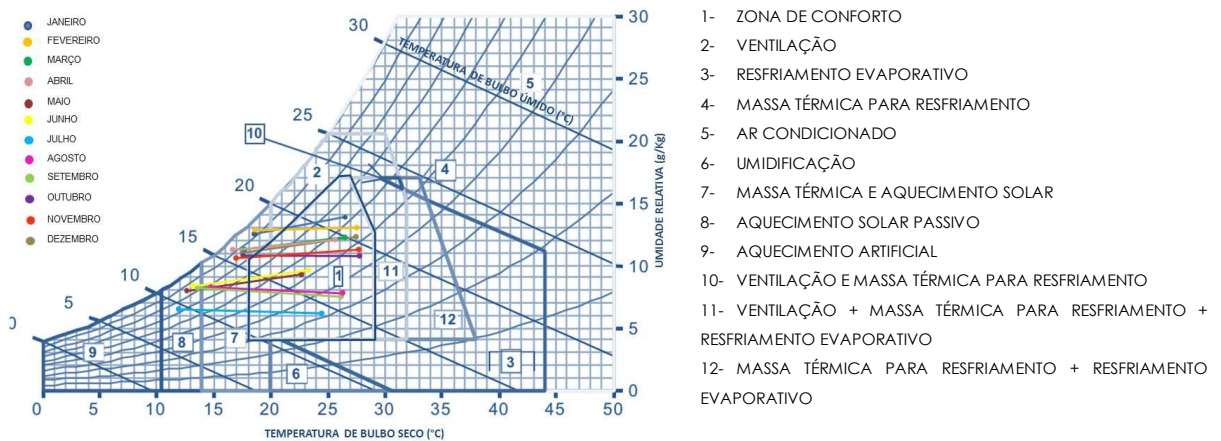


Figura 46: Diagrama bioclimático de Givoni para a cidade de São Carlos (SP).
 Fonte: Adaptado MARQUES (2013).

As estratégias bioclimáticas obtidas mês a mês pelo programa *Analysis Bio* (LABEEE, 2009) seguem na tabela 3.

Tabela 3: Dados mensais e estratégias para a cidade de São Carlos (SP)

Mês	Alta inércia Térmica (%)	Aquecimento Solar Passivo (%)
Janeiro	25.7	-
Fevereiro	22.8	-
Março	18.8	-
Abril	24.5	-
Maio	38.4	7.7
Junho	37.4	18.7
Julho	37.4	24.3
Agosto	33.9	12.7
Setembro	35.2	-
Outubro	50	-
Novembro	20.6	-
dezembro	19.3	-
média	30.3	5.3

Fonte: Adaptado de Analysis Bio (LABEEE, 2009)

De acordo com a tabela 3, as principais estratégias bioclimáticas para a cidade de São Carlos (SP) são alta inércia térmica e aquecimento solar passivo.

3.5.2. Natal (RN)

Natal é uma cidade localizada no nordeste do Brasil, capital do Estado do Rio Grande do Norte e possui latitude $-05^{\circ} 47'$ e longitude $-35^{\circ} 12'$, com 49m de altitude.

A figura 47 apresenta os dados de temperatura anual obtidos pelo software *Climate Consultant* (LIGGETT, 2012). O que se pode notar é que Natal possui elevadas temperaturas ao longo do ano, de acordo com o gráfico as temperaturas variam de 24°C a 38°C em 74% do ano, enquanto varia de 22°C a 24°C em apenas 24% do ano, na maior parte entre os meses de junho a setembro.

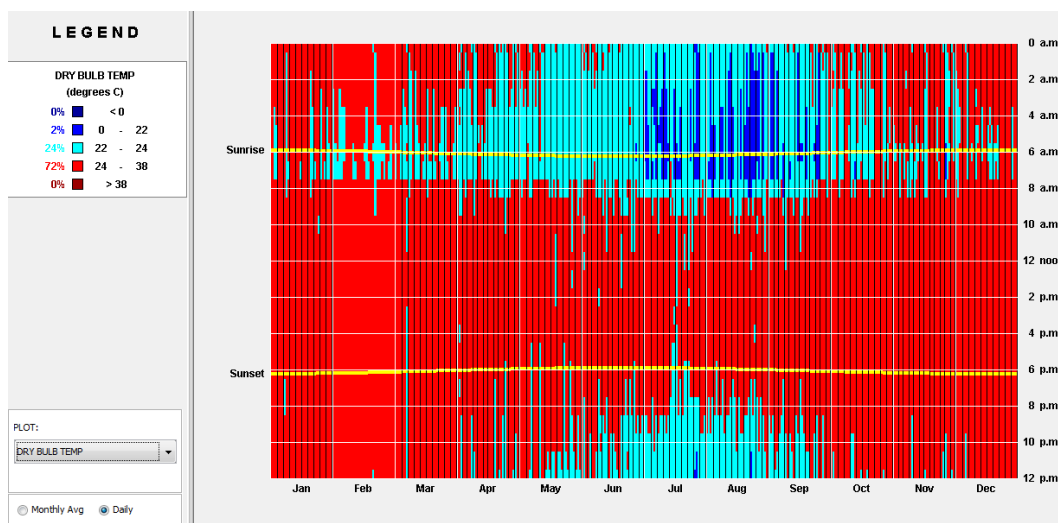


Figura 47: Variação da temperatura ao longo do ano para a cidade de Natal (RN).

Fonte: Adaptado de *Climate Consultant* (LIGGETT, 2012)

A variação da temperatura também pode ser notada pela tabela 4, em que são apresentadas as temperaturas mensais ao longo do ano para a cidade de Natal. Os dados foram obtidos por meio do arquivo climático inserido no programa *Climate Consultant* (LIGGETT, 2012).

Tabela 4: Temperatura mensal ao longo do ano para a cidade de Natal (RN)

MÊS	TBS (°C)	UMIDADE (%)	VELOCIDADE DOS VENTOS (m/s)
Janeiro	26	77	3
Fevereiro	27	77	2
Março	27	79	3
Abril	25	83	3
Maio	25	84	3
Junho	24	85	3
Julho	24	83	4
Agosto	24	84	3
Setembro	24	80	4
Outubro	26	74	3
Novembro	26	74	4
Dezembro	26	73	3

Fonte: Adaptado de *Climate Consultant* (LIGGETT, 2012).

Em relação aos ventos, tem-se que a direção predominante é sudeste e varia entre 8m/s a 10 m/s. A umidade relativa do ar, na maior parte do ano situa-se acima dos 70%, haja vista que Natal é uma cidade litorânea. A rosa dos ventos gerada para a cidade de Natal demonstra esses dados, como pode ser visto na figura 48.

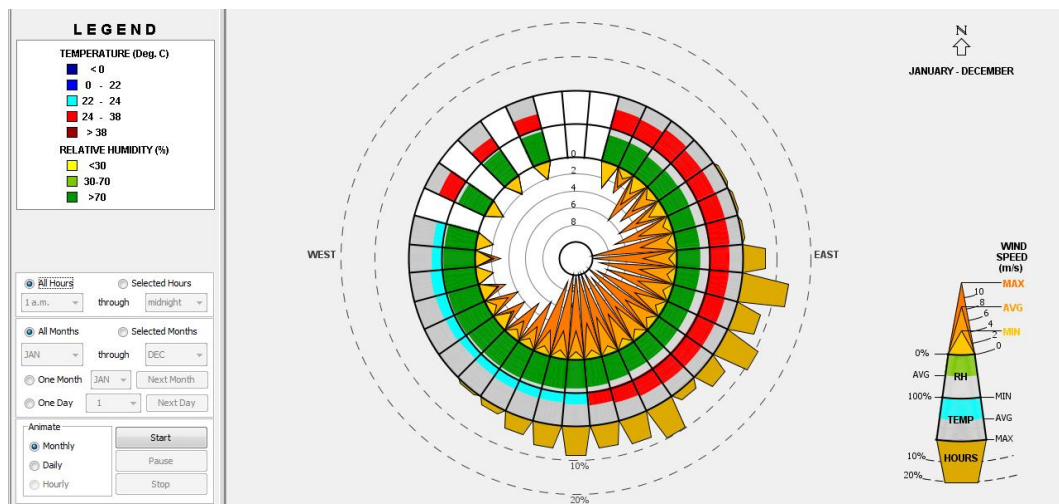


Figura 48: Rosa dos ventos para a cidade de Natal (RN).
Fonte: Adaptado de *Climate Consultant* (LIGGETT, 2012).

De acordo com o diagrama bioclimático de Givoni para países em desenvolvimento (figura 49), a cidade de Natal está com 54% de horas do ano em conforto, enquanto em 46% não está em situação de conforto.

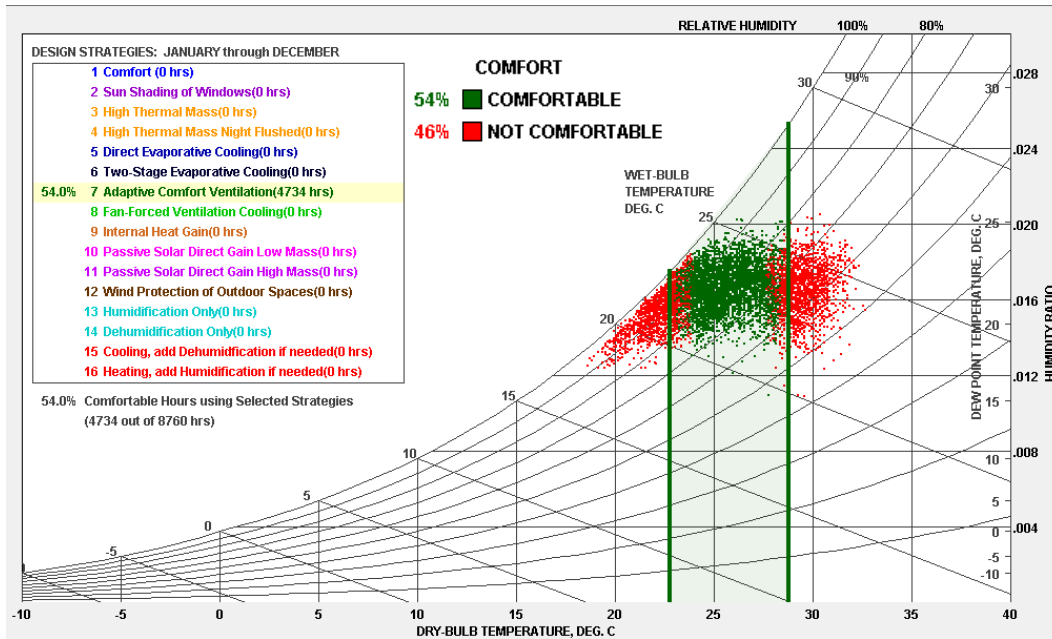


Figura 49: Diagrama bioclimático de Givoni para a cidade de Natal (RN).
Fonte: Adaptado de *Climate Consultant* (LIGGETT, 2012).

As estratégias bioclimáticas obtidas mês a mês pelo programa *Analysis Bio* (LABEEE, 2009) seguem na tabela 5.

Tabela 5: Dados mensais e estratégias para a cidade de Natal (RN)

Mês	Ventilação (%)	Desumid. (%)	Massa térmica resfr. (%)	Sombr. (%)
Janeiro	68.4	43.5	25.5	37.1
Fevereiro	60.1	36.2	31.3	35.1
Março	55.8	36.7	31.9	34.4
Abril	51.1	55.3	23.9	33.5
Mai	50.9	61.3	19.1	32.8
Junho	54.3	71.7	13.2	31
Julho	38.7	74.1	12.9	30.1
Agosto	39	69.2	16.9	29.7
Setembro	44.4	66.8	20.8	33.2
Outubro	58.7	58.2	26.3	35.3
Novembro	65.1	58.2	25.1	36
dezembro	62.4	52.3	31.2	37.4
média	54.08	56.96	23.18	33.8

Fonte: Adaptado de *Analysis Bio* (LABEEE, 2009)

De acordo com a tabela 5, as principais estratégias bioclimáticas para a cidade de Natal (RN) são ventilação e desumidificação, seguidas de sombreamento das aberturas e massa térmica para resfriamento.

3.6. Definição do Índice de Conforto Térmico

Para se estimar e avaliar a sensação térmica das pessoas sujeitas à certas variações ambientais e pessoais, foram criados os índices de conforto térmico (FIGUEIREDO e FROTA, 2008).

De acordo com Lamberts et al (2012), para que as pessoas possam alcançar o conforto térmico nos ambientes, três condições são necessárias, a saber: a pessoa deve encontrar a neutralidade térmica; a temperatura da pele e a taxa de secreção de suor, devem estar dentro dos limites compatíveis com sua atividade; e a pessoa não deve estar exposta a desconforto localizado.

Tais parâmetros são apresentados pelo autor num diagrama (figura 50), representando as condições necessárias à obtenção de conforto térmico.

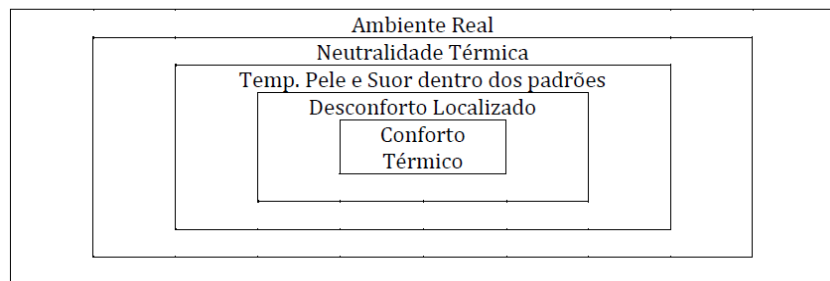


Figura 50: Representação esquemática das condições necessárias à obtenção de conforto térmico. Fonte: Adaptado de LAMBERTS et al (2012).

No Brasil, várias regulamentos e selos de eficiência energética para edificações ainda estão sendo debatidos. Segundo Pereira e Assis (2010), a avaliação do desempenho da edificação em termos de conforto do usuário ainda é baseado em normas internacionais, tais como a ASHRAE *Standard* 55 e a ISO 7730, cuja última é fundamentada pelo modelo do Voto Médio Predito (PMV), desenvolvido por Fanger.

Ainda de acordo com o autor, no Brasil não existe um consenso sobre qual índice de conforto utilizar, então alguns autores têm adotado diferentes índices adaptativos, os quais são caracterizados pela simplicidade dos dados exigidos, sendo uma temperatura de conforto calculada com base na temperatura média mensal registrada.

Segundo Lamberts et al (2012), para o modelo adaptativo, a sensação de conforto térmico deveria ser avaliada a partir de um valor médio mensal de temperatura, e não apenas pela temperatura do ambiente interno, uma vez que o desconforto pode surgir a partir da contradição entre o ambiente que as pessoas esperam encontrar e os que elas realmente encontram.

Dessa forma, para a análise da presente pesquisa foi selecionada a norma ASHRAE 55 - 2004 "*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*", a qual possui um índice fundamentado na teoria adaptativa de conforto térmico de Brager e De Dear, e considera a

possibilidade de controle das aberturas pelos usuários, ao mesmo tempo que aumenta os limites de velocidades do ar internos (FIGUEIREDO e FROTA, 2008).

De acordo com Figueiredo e Frota (2008), a norma se constitui na hipótese de um ambiente termicamente uniforme com possibilidade de controle das aberturas pelos usuários, estabelecendo assim que esses usuários poderão tolerar mudanças nas condições ambientais. Tais parâmetros podem auxiliar os projetistas na definição de quando o condicionamento de ar será realmente necessário, proporcionando assim maiores níveis de conforto térmico aos usuários.

A norma ASHRAE 55 (2004) requer como dados de entrada a média mensal das temperaturas externas (média aritmética da média mensal das máximas e da média mensal das mínimas); e a temperatura operativa (média aritmética entre a temperatura interna do ar e a temperatura radiante).

O objetivo desta norma, segundo Lamberts et al (2012), é gerar combinações de fatores térmicos para o ambiente interno (temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa e velocidade do ar) e fatores subjetivos ligados aos ocupantes (taxa metabólica e vestimenta), possibilitando condições térmicas satisfatórias para os usuários.

Os limites de temperatura operativa em função da temperatura externa são apresentados na figura 51, demonstrando duas faixas de limite de temperatura, sendo uma para 80% de aceitabilidade (utilizado em aplicações típicas) e outra para 90% de aceitabilidade (utilizado para atingir um nível de conforto elevado).

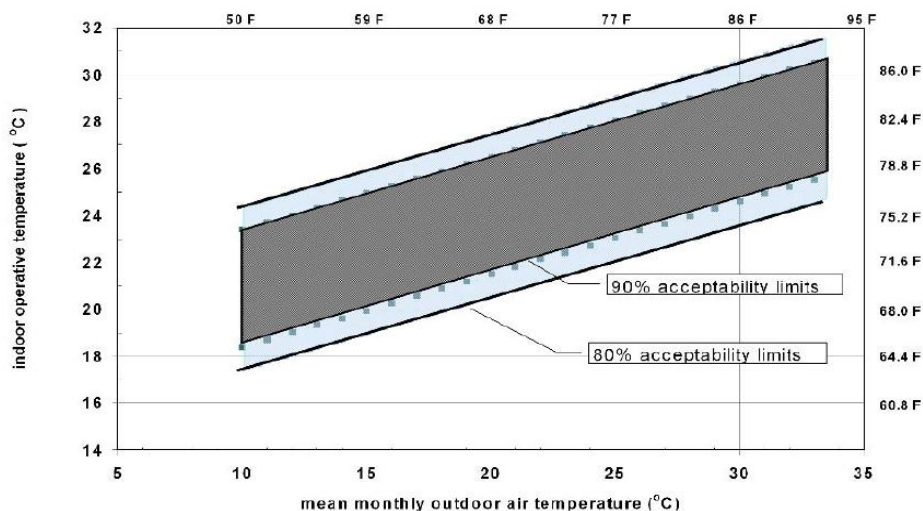


Figura 51: Intervalo de temperatura operativa aceitável para espaços condicionados naturalmente.
Fonte: Adaptado de LAMBERTS et al (2012).

Os níveis de conforto são calculados com base na temperatura externa do ar, conforme a equação 2.

$$T_n = 17.8 + 0,31 \times T_{\text{Emed}} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

T_n (°C) = Temperatura operativa interna ou de neutralidade térmica

T_{Emed} (°C) = Média mensal da temperatura externa, sendo que a equação é válida apenas entre as temperaturas entre 10 e 33.5°C.

Conforme fora supracitado, a ASHRAE estabelece um intervalo de temperaturas confortáveis por meio de limites estabelecidos a partir da temperatura neutra, somando-se ou subtraindo-se esses limites da temperatura. Para que haja 90% de usuários satisfeitos, a tolerância é de 2.5°C e para atender 80% das pessoas a tolerância é de 3.5°C. Para este trabalho foi selecionado o índice de 90%.

Dessa forma, o pressuposto fundamental da abordagem adaptativa é expresso pelo princípio de adaptação: se ocorrer uma alteração de modo a produzir desconforto, as pessoas reagem de maneira que tendem a restaurar o seu conforto (NICOL e HUMPHREYS, 2002).

Tendo em vista os objetivos da presente pesquisa, em analisar o potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com estratégias de ventilação híbrida, e o modelo adaptativo de análise do conforto, tem-se um fator em comum: a importância da presença do usuário no edifício, uma vez que são eles que operam as aberturas e modificam o ambiente a todo o momento, tendo uma tendência natural para se adaptar às condições de mudança em seu ambiente.

3.7. A escolha do modelo do edifício

A escolha do modelo de edifício a ser analisado na presente pesquisa baseou-se na dissertação de mestrado de Kellen Regina Monte Carrières (CARRIÈRES, 2007) que, sob orientação do prof. Maurício Roriz, fez um levantamento das tipologias de edifícios de escritórios existentes na cidade de São Carlos com mais de quatro pavimentos com o objetivo de estudar o desempenho térmico e consumo energético dos mesmos.

Dentre os edifícios apresentados, o modelo mais comum à tipologia padrão dos edifícios de escritórios e o de maior área construída é o Racz Center, modelo-base selecionado para a presente pesquisa. Tal edifício está implantando na região central da cidade de São Carlos, cujo entorno é composto por edificações comerciais e de serviços. Um quadro-resumo (quadro 2) é apresentada abaixo, com base no trabalho de Carrières (2007), com as principais características do edifício.

Quadro 2: Caracterização do edifício Racz Center

EDIFÍCIO RACZ CENTER, São Carlos / SP				
				
Vista aérea			Vista fachada frontal	
Tipologia arquitetônica				
				
PAVIMENTO-TIPO EXISTENTE				
Características gerais				
Projetista: Anibal Fernandes Construtora: Racz Construtora S.A. Início de ocupação: 1975				
Total de pavimentos: 11			Área total do edifício: 5728.50 m ²	
Pavimentos-tipo: 10	Pé-direito: 3.10m		Área de cada pavimento: 495.00m ²	
Salas por pavimento-tipo: 10			Área média de cada sala: 34.60m ²	
Características gerais de implantação				
Altura (m)	Largura (m)	Comprimento (m)	Área fachada 1	Área fachada 2
34.10	34.25	15.80	1167.92	538.78
Características construtivas				
Estrutura	Concreto armado			
Laje	Laje maciça de concreto Laje dos pavimentos-tipo: maciça de concreto Laje de cobertura: maciça de concreto impermeabilizada			
Parede externa	Bloco cerâmico tipo tijolo baiano com espessura de 27cm			
Revestimento	Reboco e revestimento cerâmico			
Esquadrias	Esquadria de ferro na cor branca com vidro transparente de 6mm			

Fonte: Adaptado de CARRIÈRES, 2007

Atualmente existem outros edifícios de escritórios na cidade de São Carlos, porém com tipologias diferentes e com menos salas. Por isso, foi mantida a escolha pelo modelo do edifício Racz Center.

No entanto, para facilitar a compreensão e simulação do edifício, foram feitas simplificações no desenho do modelo, para que se aproximasse ao máximo de um edifício

retangular. Dessa forma, o modelo foi compactado de modo que não haja reentrâncias (os banheiros foram alterados) e o átrio que havia entre a caixa de escadas/elevadores também foi retirado. As últimas salas, na lateral esquerda, também foram modificadas, de modo a manterem a mesma largura das demais. O modelo que será utilizado para as simulações é apresentado no quadro 3.

Quadro 3: Caracterização do modelo simplificado do edifício Racz Center.

EDIFÍCIO RACZ CENTER, São Carlos / SP (modelo simplificado)				
Tipologia arquitetônica				
PAVIMENTO-TIPO SIMPLIFICADO				
Características gerais				
Total de pavimentos: 11		Área total do edifício: 5236.55 m ²		
Pavimentos-tipo: 10	Pé-direito: 3.10m	Área de cada pavimento: 476.05m ²		
Salas por pavimento-tipo: 10		Área média de cada sala: 32.00m ²		
Características gerais de implantação				
Altura (m)	Largura (m)	Comprimento (m)	Área fachada 1 (m ²)	Área fachada 2 (m ²)
30.10	30.05	15.80	904.50	475.58
Características construtivas				
Estrutura	Concreto armado			
Laje	Laje maciça de concreto Laje dos pavimentos-tipo: maciça de concreto Laje de cobertura: maciça de concreto impermeabilizada			
Parede externa	Bloco de concreto furado com espessura de 25cm			
Revestimento	Reboco e pintura			
Esquadrias	Esquadria de ferro na cor branca com vidro transparente de 6mm			

Para as simulações serão consideradas paredes de bloco de concreto furado ao invés do bloco cerâmico por conta de uma adaptação ao modelo, além de que neste edifício também foi feita uma alteração na fachada, antes revestida por pastilhas cerâmicas, atualmente é apenas revestida com reboco e pintura. Tal alteração fez com que a espessura da parede externa tenha 25cm (pelo trabalho de Carrières possuía 27cm).

3.7.1. Preparação do modelo para as simulações

Para as simulações computacionais foi selecionado um módulo do pavimento-tipo apresentado anteriormente, que seria representativo do edifício, com paredes, piso e teto adiabáticos e janela voltada ao exterior (parede não adiabática). O recorte feito no modelo se justifica pela simplificação dos dados e parâmetros a serem inseridos nos programas de modelagem (*EnegyPlus* e *Daysim*), ao mesmo tempo que tal simplificação pode permitir uma maior compreensão do estudo do fenômeno da ventilação híbrida, uma vez que a modelagem no módulo *Airflow Network* é complexa e gera grandes erros se não for inserida corretamente.

Nos trabalhos de Rupp (2011), Reinhart e Wienold (2011) e Ghisi (2002), tal recorte também foi feito, conforme apresentado na figura 52, os quais concluíram que trabalhar com um módulo do edifício representa melhor a realidade.

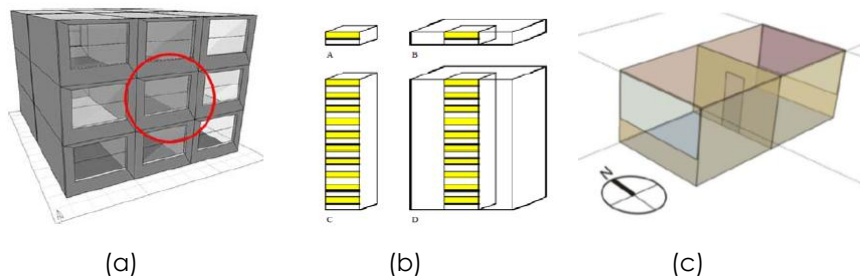


Figura 52: Modelo adotado por (a) Reinhart e Wienold (2011); (b) Ghisi (2002) e Rupp (2011).
Fonte: Adaptado de Rupp (2011).

Dessa forma, com base em tais estudos, para a presente pesquisa foi feito um recorte de modo que o módulo representativo da edificação seja composto por duas salas separadas por um corredor central, fazendo com que ambas fiquem em lados opostos. Tal configuração pode permitir o estudo do efeito da ventilação cruzada. O módulo a ser simulado é apresentado pela figura 53.

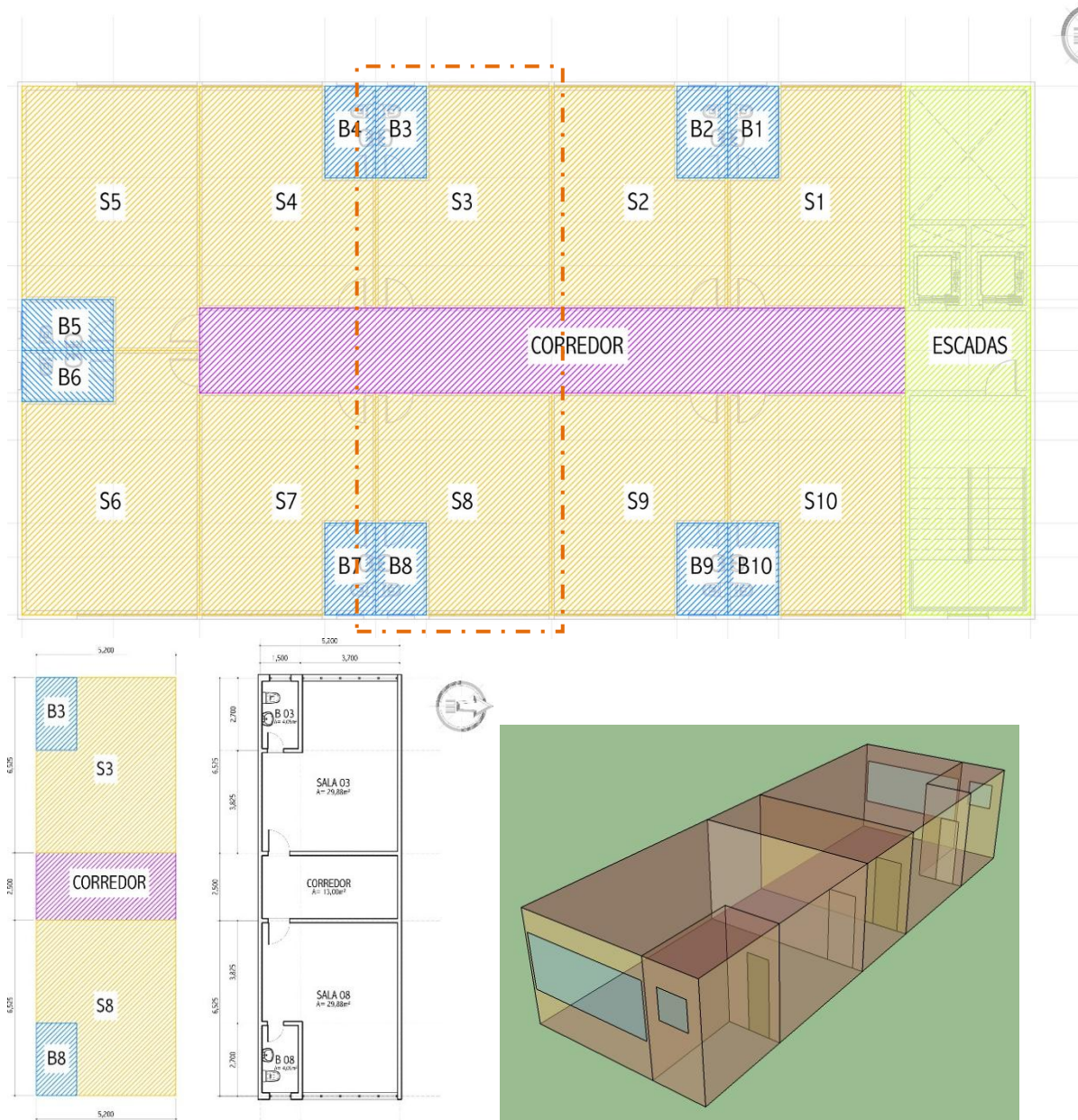


Figura 53: Modelo a ser simulado.

O modelo é composto por cinco zonas, sendo duas salas com banheiro e um corredor central. Ambas as salas possuem as mesmas dimensões e área, medindo 29.88m^2 . Os banheiros medem 4.05m^2 e o corredor mede 13m^2 de área. O pé-direito é de 3.10m .

Para as análises de iluminação natural, termo-energética e de ventilação híbrida serão considerados apenas os ambientes das salas. Os banheiros e o corredor, por serem de menor permanência e área, não serão analisados.

No trabalho de Marques (2013), foram feitas várias simulações com posições de eixos de dimensionamentos em diferentes posições das paredes (externo, meio e interno) e foi comprovado que para que haja menos erros na simulação, o melhor posicionamento do eixo

é no meio da parede. Dessa forma, as dimensões das salas estão cotadas a partir do eixo central das mesmas. A tabela 6 apresenta as principais dimensões do modelo.

Tabela 6: Resumo das dimensões do modelo a ser simulado.

Ambiente	Dimensões (m) L x P	Área (m ²)	Pé-direito (m)
Sala 3 / Sala 8	5.20 x 6.52	29.88	3.10
Banheiro 3 / Banheiro 8	1.50 x 2.70	4.05	3.10
Corredor	5.20 x 2.50	13.00	3.10

Para as janelas foram consideradas porcentagens de abertura na fachada (PAF) de 30% e 50% (ver figura 54), com janelas do tipo pivotantes, com ângulo de abertura de 90°, o que representa uma abertura total de 100%.

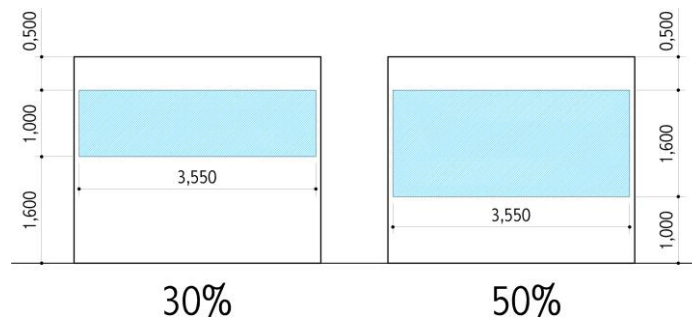


Figura 54: Dimensões das aberturas.

Para o valor da absorvância solar das paredes externas, foi feito um cálculo baseando-se na proporção das áreas das cores da fachada (verde e amarelo – figura 55). De acordo com Dornelles (2008), para se calcular o valor da absorvância solar a ser utilizada nas simulações quando a fachada possui mais de uma cor, é necessário calcular pela área proporcional de cada absorvância. Na tabela de cores presentes em Dornelles (2008), foram selecionadas duas cores semelhantes à fachada do prédio, sendo verde (alecrim) e amarelo (vanila), tendo ambos absorvância de 0.63 e 0.24, respectivamente. Dessa forma, pelos cálculos se chegou a um valor de absorvância solar total de 0.39.

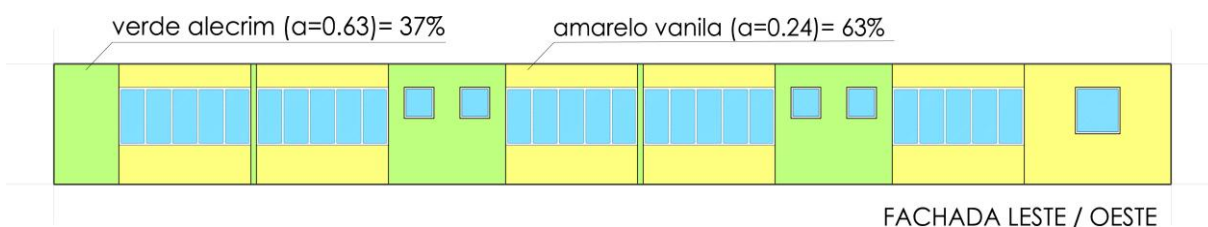


Figura 55: Porcentagem de área de cada cor na fachada.

Os parâmetros inseridos como dados de entrada (*inputs*) para as simulações no EnergyPlus são apresentados no quadro 4.

Quadro 4: Dados de entrada (inputs)

Parâmetros		Variáveis	
Dimensões retangulares (cada sala)		5.20 x 6.52 m	
Dimensões retangulares (módulo)		15.55 x 5.20 m	
Número de pavimentos		1 ^(A)	
Percentual de área de janela na fachada principal		50% / 30%	
Vidro	Cor	incolor	
	Espessura	6mm	
Transmitância térmica	Paredes externas ^(B)	2.62 W/m ² K	
	Paredes internas ^(B)	2.27 W/m ² K	
	Cobertura ^(C)	2.04 W/m ² K	
Absortância	Paredes externas	Solar	0.39
		Visível	0.40
	Paredes internas	Solar	0.30
		Visível	0.27
	Cobertura	Solar	0.30
		visível	0.27
Ocupação		4 pessoas (7,47 m ² / pessoa)	
Densidade de carga interna	Equipamentos	15 W/ m ² ^(D)	
	Iluminação	12 W/m ²	
Padrão de uso	Ocupação	8 - 12h / 14 - 18h	
	Equipamentos	8 - 12h / 12h - 14h ^(E) 14 - 18h	
	Iluminação	8 - 12h / 14 - 18h	
Características do sistema de ar condicionado	Tipo	Ideal	
	Temperatura de <i>setpoint</i>	25°C para resfriamento ^(F)	
<p>^(A) O modelo encontra-se inserido num edifício, em um pavimento intermediário.</p> <p>^(B) A parede externa é composta por argamassa exterior (2,5 cm) + bloco de concreto furado (19 cm) + argamassa interior (2.5 cm) / (bloco 19x19x39cm). A parede interna é composta por argamassa exterior (2,5 cm) + bloco de concreto furado (9 cm) + argamassa exterior (2.5 cm) / (bloco 9x19x39cm).</p> <p>^(C) A cobertura / laje são compostas por uma laje de concreto de 8cm.</p> <p>^(D) Foram considerados como equipamentos 4 computadores.</p> <p>^(E) Durante o horário de almoço foi considerado que os equipamentos fiquem ligados e gastando metade da sua potência, uma vez que estarão em modo de espera.</p> <p>^(F) A temperatura de <i>setpoint</i> para resfriamento foi definida em 25°C (temperatura obtida como resultado das medições feitas no IAU)</p>			

O piso foi considerado isolado (adiabático) assim como todas as paredes (exceto a parede da janela), já que o modelo simulado é apenas uma sala (que está inserida num pavimento intermediário de um edifício). O entorno (edificações, vegetação, etc) também não foi considerado. O modelo foi simulado para as orientações apresentadas no quadro 5.

Quadro 5: Orientações simuladas para cada cidade.

	SÃO CARLOS	NATAL
MÓDULO 1	Norte / Sul	Norte / Sul
MÓDULO 2	Nordeste / Sudoeste	Sudeste / Noroeste
MÓDULO 3	Leste / Oeste	Leste / Oeste

Diante de tais parâmetros, as simulações foram feitas no sentido de se obter os efeitos durante o período de ocupação quando:

- 1) apenas o ar condicionado estiver ligado;
- 2) apenas a ventilação natural for permitida;
- 3) utilizar a integração de ventilação natural e condicionamento de ar (estratégia de ventilação híbrida).

Paras as simulações optou-se por fixar alguns parâmetros e variar outros, no sentido de direcionar melhor os resultados da pesquisa. Como parâmetros fixos selecionou-se os seguintes:

- geometria do modelo;
- ganhos internos;
- coeficientes de pressão (calculados automaticamente pelo *EnergyPlus*);
- uso da climatização artificial (em complemento à ventilação natural);
- uso da iluminação artificial (em complemento à iluminação natural);
- uso de estratégias de ventilação híbrida.
- Tipo de janela (pivotantes, com ângulo de abertura de 90°)

Já em relação aos parâmetros a serem variados, tem-se:

- área de abertura (30% e 50% em relação à área de fachada);
- orientação.

3.7.2. Modelagem para Simulação da Iluminação Natural

O cálculo de simulação da iluminação natural no programa *Daysim* se apresenta mais confiável e preciso em relação ao módulo de iluminação natural do programa *EnergyPlus*, conforme fora supracitado anteriormente, pois segundo Ramos e Ghisi (2010), o programa *EnergyPlus* superestima valores de iluminância dentro do ambiente, enquanto o programa *Daysim* apresenta um gradiente dessas iluminâncias de acordo com cada ponto da malha no plano de trabalho, o que o aproxima da realidade, sendo assim, mais preciso.

Dessa forma, foram realizadas simulações no *Daysim* (versão 3.1), com nível de iluminância mínima de 500lux, conforme recomendado para atividade de escritórios pela norma NBR 5413 – Iluminância de Interiores (ABNT, 1992). As refletâncias consideradas são: teto= 80%, parede=60% e piso=20%.

Os arquivos climáticos utilizados foram o da cidade de São Carlos (SP) e Natal (RN). A geometria foi modelada no programa *Sketchup* (versão 7.0) e importadas para o *Daysim* por meio de um *plugin* (Suds2s).

Durante a modelagem no *Sketchup* foi criada uma malha de pontos, que representa uma superfície horizontal localizada a 80cm de altura do piso, através da qual os sensores serão capazes de medir as iluminâncias em cada ponto do plano de trabalho. De acordo com a norma NBR 15215-4 - Iluminação natural – Parte 4: Verificação experimental das

condições de iluminação interna de edificações – Método de medição (ABNT, 2004) - a quantidade de pontos da malha de medição é definida de acordo com a seguinte equação:

$$K = \frac{C \cdot L}{H_m \cdot (C + L)} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

K é o número de pontos da malha de medição

L é a largura do ambiente, em metros;

C é o comprimento do ambiente, em metros;

H_m é a distância vertical, em metros, entre a superfície de trabalho e o topo da janela, em metros.

Tal resultado deve ser comparado com a tabela 7, que indica a quantidade mínima de pontos da malha de acordo com o valor de K.

Tabela 7: Quantidade mínima de pontos a serem medidos

K	Nº de Pontos
K < 1	9
1 ≤ K < 2	16
2 ≤ K < 3	25
K ≥ 3	36

Fonte: Adaptado de CIBSE (1984) apud ABNT (2004).

Dessa forma, foi calculado o número de pontos para a malha de medições do modelo a ser simulado, obtido o valor de 16 pontos, no mínimo. Na modelagem do *Sketchup* foi inserida uma malha com 18 pontos equidistantes de 1.35m entre si, e 0.80m de altura em relação ao piso, conforme apresentado na figura 56.

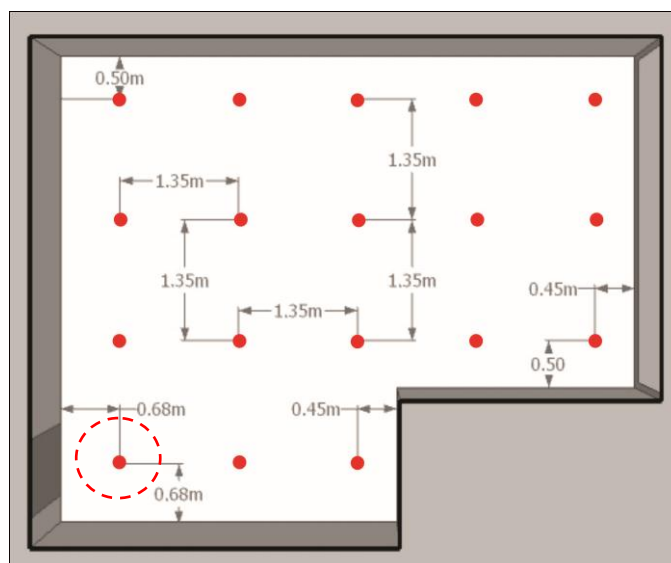


Figura 56: Distribuição da malha de pontos.

A malha de pontos, criada a partir da modelagem no programa *Sketchup*, é definida no *Daysim* em um editor de texto, que apresenta o posicionamento de cada ponto da malha de acordo com os eixos X, Y e Z. Dessa forma, um sensor localizado no ponto 1 (figura 56), o qual é definido pela linha de comando: 0.68 0.68 0.80 0 0 1, significa que sensor está na posição X=0.68m Y=0.68m, Z=0.80m e está voltado para cima.

Após realizar a simulação no *Daysim*, é necessário selecionar os pontos da malha (previamente desenhada no *Sketchup*), onde estarão localizados os sensores de iluminação do plano de trabalho que serão utilizados para os cálculos da iluminação artificial.

No presente trabalho, todos os pontos da malha foram considerados com sensores, a fim de analisar o aproveitamento da iluminação natural no ambiente como um todo. Para o cálculo do consumo de energia elétrica foi considerado uma DPI (Densidade de Potência Instalada) de 12W/m² (ambiente de escritório pela norma ASHRAE 90.1/2007), que é regulada por um sistema dimerizável, de acordo com a disponibilidade de iluminação natural no ambiente. A escolha da utilização de tal sistema, apresentado no item 2.4 pelo trabalho de Rocha e Pereira (2011), se justifica pelos resultados da mesma pesquisa, que demonstrou uma redução de até 80% no consumo de energia elétrica.

Para realizar a simulação no *Daysim*, os parâmetros selecionados para esta pesquisa foram os referentes à *Scene Complexity 1*, que representa uma sala limitada pelo envelope do edifício, o qual é composto por elementos básicos (translúcido, transparente e opaco), sem a presença de brises ou quaisquer outros mecanismos de controle da iluminação natural (REINHART, 2010 apud RUPP, 2011).

Após a simulação no *Daysim*, alguns parâmetros devem ser definidos para a realização das análises da iluminação natural, conforme as definições apresentadas no quadro 6.

Quadro 6: Parâmetros a serem definidos para as análises de iluminação natural

Parâmetros	Variáveis
Atividades realizadas no ambiente	atividades de escritório
Horário de funcionamento das atividades	das 8h às 18h, de segunda à sexta, considerando intervalo para o almoço
Nível de iluminação mínimo	500 lux (NBR 5413/1992)
Densidade de Potência Instalada	12W/m ² (ASHARE 90.1/2007)
Área da sala	29.88m ²
Sistema de controle de iluminação	Sistema dimerizável, que funciona de acordo com a disponibilidade de iluminação natural
Localização dos sensores	Localizados em todos os pontos da malha de medição

Como resultado da simulação no *Daysim*, é emitida uma planilha com *schedule* de base horária de funcionamento da iluminação artificial, sendo que o valor 0 representa o nível de iluminância máximo obtido apenas com iluminação natural e o valor 1 como sendo que a iluminação artificial seja utilizada em sua máxima potência. Os valores intermediários representam a integração entre a iluminação natural e a artificial, sendo que ambas estejam trabalhando para alcançar o nível desejado de 500 lux de iluminância.

Tais dados obtidos pela simulação no *Daysim* (planilhas com extensão “.csv”) são inseridos como *schedules* de controle da iluminação através do objeto *Schedule File* no *EnergyPlus*. Dessa forma, a densidade de potência é controlada por essa *schedule*.

As lâmpadas selecionadas para este estudo são as fluorescentes tubulares TLDRS 32W - S84 ECO, da Philips, cujas características são apresentadas no quadro 7.

Quadro 7: Características das lâmpadas e luminárias.

		Características
LÂMPADAS	Código	TLDRS 32W-S84-ECO
	Modelo	Lâmpada fluorescente tubular
	Potência (W)	32
	Temperatura de Cor (K)	4000
	Fluxo Luminoso (lm)	2700
	Eficiência Luminosa (lm/W)	84
	Índice de Reprodução de Cor (IRC)	85
LUMINÁRIAS	Código	TCS 020 Slimline
	Modelo	Sobrepor
	Tipo de Lâmpada	2x TLD 16/32W
	Conjunto óptico	Refletores parabólicos brilhantes sem aletas

As luminárias selecionadas para esta pesquisa se justificam pela eficiência, uma vez que, de acordo com Ramos e Lamberts (s/d), luminárias sem aletas e com refletores de alumínio apresentam fatores de utilização mais elevados e atingem o nível A com maior facilidade, o que não acontece com os modelos com aletas.

3.7.3. Modelagem para Simulação da Ventilação Natural

A simulação da ventilação natural foi feita por meio do módulo *Airflow Network* no programa *EnergyPlus*. O modelo selecionado é o multi-zona sem distribuição e os coeficientes de pressão do vento foram calculados automaticamente pelo próprio programa.

O estudo foi feito no modelo apresentado anteriormente (item 3.7.1.), em que há um módulo com duas salas separadas por um corredor central. Para a simulação no módulo *Airflow Network* é necessário que haja, no mínimo duas zonas.

Os parâmetros utilizados para a utilização do módulo *Airflow Network* são apresentados no quadro 8.

Quadro 8: Parâmetros da modelagem da ventilação natural.

Parâmetro	Variável
Tipo de controle	Temperatura
Setpoint de controle	20°C
Fator de abertura para portas e janelas	1
Tipo de janela	pivotantes, com eixo centralizado na metade da altura da janela, e com ângulo de abertura de 90°, o que representa uma abertura de 100% do vão, para que haja maior impacto da ventilação no ambiente.
Tipo de porta	Não pivotantes (porta de abrir)

O tipo de controle da ventilação é feito por temperatura, então as janelas são abertas se três requisitos forem cumpridos: a) a temperatura da zona for maior que a temperatura externa; b) a temperatura da zona for maior que a temperatura de *setpoint* para a ventilação natural; e c) a *schedule* de controle da ventilação natural permitir a ventilação ($T_{zona} > T_{ext}$ e $T_{zona} > T_{set}$ e a *schedule* de controle da ventilação natural for igual a 1). O fator de abertura para portas e janelas representa se são elementos operáveis (igual a 1) ou não operáveis (igual a zero).

Os coeficientes e expoentes do fluxo de ar são apresentados pela tabela 8, representando as frestas existentes quando as portas e janelas estiverem fechadas.

Tabela 8: Coeficientes de descarga e expoentes do fluxo de ar das aberturas quando estão fechadas.

Descrição	Coefficiente (kg/s.m)	Expoente (n)
Janela de metal – 1 folha (pivotantes)	0.0162	0.5
Porta interna de madeira, 1 folha não-pivotante	0.00437	0.65

Fonte: Adaptado de Liddament (1986) apud LAMBERTS et al (2008).

Os parâmetros de detalhamento das aberturas são apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros de detalhamento das aberturas

Parâmetros	Janelas	Portas
Número de frações de abertura	2	2
Fator de abertura 1	0	0
Coefficiente de descarga para o fator de abertura 1	0.001	0.001
Fator de largura para o fator de abertura 1	0	0
Fator de altura para o fator de abertura 1	1	1
Fator de altura inicial para o fator de abertura 1	0	0
Fator de abertura 2	1	1
Coefficiente de descarga para o fator de abertura 2	0.6	0.65
Fator de largura para o fator de abertura 2	1	1
Fator de altura para o fator de abertura 2	1	1
Fator de altura inicial para o fator de abertura 2	0	0

Fonte: Adaptado de Rupp (2011).

De acordo com Rupp (2011), o número de frações de abertura representa se as aberturas podem estar abertas ou fechadas. O número de frações de abertura selecionado para a modelagem é 2. Os coeficientes de descarga é relativo à fração eficaz da ventilação natural das portas e janelas; o fator de largura para o fator de abertura é a razão da largura da abertura pela largura da janela ou da porta; o fator de altura para o fator de abertura é a razão da altura da abertura pela altura da janela ou da porta; o fator de altura inicial é a razão da altura do piso até a parte inferior da janela pela altura da janela ou da porta.

3.7.4. Modelagem do Sistema de Condicionamento de ar

O modelo de condicionador de ar selecionado no programa *EnergyPlus* para a presente pesquisa é do tipo ideal. O ar condicionado do tipo ideal informa a quantidade de carga térmica necessária para manter o ambiente dentro das temperaturas estabelecidas.

O primeiro passo para a modelagem desse aparelho é adicionar um sistema na classe dos objetos *HVACTemplate:Thermostat* e configurar os parâmetros de acordo com o quadro 9.

Quadro 9: Parâmetros de modelagem do termostato.

Parâmetros	definição
Nome	Termostato
Nome da <i>Schedule de Setpoint</i> para Aquecimento	<i>schedule</i>
<i>Setpoint</i> constante para aquecimento	Valor em °C
Nome da <i>Schedule de Setpoint</i> para Resfriamento	<i>schedule</i>
<i>Setpoint</i> constante para resfriamento	Valor em °C

Fonte: Adaptado de *EnergyPlus* (EERE, 2012)

Foram definidas duas *schedules*, uma de aquecimento e uma de resfriamento, para o termostato, sendo que ambas funcionam de maneira a manter a temperatura de *setpoint* para aquecimento de 18°C e de 25°C para resfriamento, durante a semana, das 8h às 18h.

Em seguida é preciso inserir um objeto ao grupo *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*, em que se deve definir um item para cada zona, conforme apresentado no quadro 10.

Quadro 10: Parâmetros de modelagem do sistema.

Parâmetros	definição	
Nome da Zona	sala_3	sala_8
Nome do Termostato	Termostato	Termostato

Fonte: Adaptado de *EnergyPlus* (EERE, 2012)

Dessa forma, tem-se configurado um sistema de ar condicionado ideal, que funciona apenas durante a semana, nos horários de ocupação.

3.7.5. Modelagem da Ventilação Híbrida

A ventilação híbrida foi modelada por meio de *schedules* para controlar em que momentos a ventilação ou o ar condicionado seriam acionados na simulação no *EnergyPlus*. Na presente pesquisa irá se trabalhar com o modo de ventilação híbrida alternado, conforme apresentado no item 2.2, isto é, quando o condicionador de ar é acionado, a ventilação é “desligada” e as janelas são fechadas, quando a ventilação é permitida, o condicionador de ar é desligado e as janelas são abertas.

Foram consideradas as temperaturas de 20°C para permitir a ventilação natural, conforme recomendado pelo Regulamento Técnico de Qualidade – RTQ (INMETRO, 2010), e 25°C para permitir o acionamento do condicionador de ar, conforme resultado obtido das medições e apresentado no item 3.4.

Para que se possa avaliar se ambos os sistemas estão funcionando de maneira correta, o *EnergyPlus* possui um gerenciador de ventilação híbrida, o *AvailabilityManager:HybridVentilation*, no qual é possível configurar um objeto para cada zona a ser analisada e definir padrões de temperatura para acionar a ventilação natural e o condicionador de ar, definir o modo de controle, que, no caso, foi utilizado o da temperatura.

Na planilha de resultados (*outputs*), o *EnergyPlus* apresenta dois itens: o *Hybrid Ventilation Control Status* e o *Hybrid Ventilation Control Mode*, os quais apontam em que momento cada modo está operando, de acordo com os seguintes parâmetros apresentados no quadro 11.

Quadro 11: Parâmetros de modelagem do sistema.

	Hybrid Ventilation Control Status	Hybrid Ventilation Control Mode
Opções	Definições	
0	Sem controle de ventilação híbrida	Sem controle de ventilação (ventilação natural e condicionador de ar operando baseado nos seus próprios controles)
1	Ventilação natural é permitida	Controle por temperatura
2	Ventilação natural não é permitida (o condicionador de ar é acionado)	Controle por entalpia
3	-	Controle por ponto de orvalho (dewpoint)
4	-	Controle pelo ar da ventilação externa

Dessa forma, por meio de *schedules* de controle da ventilação natural e do condicionador de ar foi possível estabelecer uma estratégia de ventilação híbrida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão apresentados os resultados referentes às simulações computacionais realizadas no modelo referenciado no item 3.7.1, para os climas de São Carlos (SP) e Natal (RN). Todas as simulações foram realizadas nos módulos com as portas fechadas.

Inicialmente serão apresentados os resultados do desempenho energético dos módulos com as janelas fechadas e o ar condicionado operando durante todo o período ocupado, caso necessário. Como o ar condicionado utilizado nas simulações no EnergyPlus é o do tipo Ideal, foi necessário fazer uma conversão para se obter o consumo de energia elétrica real do aparelho. Para isso, foi selecionado o ar condicionado do tipo *Split* e, a partir disso, foi necessário dividir o valor da carga de refrigeração gerada na simulação pelo coeficiente de eficiência energética, que para os aparelhos de nível A é igual a 3,20 W/W (INMETRO, 2010).

As análises levam em consideração o consumo parcial e total de energia elétrica (devido aos equipamentos, iluminação e ar condicionado). Em seguida, será apresentado o desempenho térmico dos módulos que possuem apenas ventilação natural. Posteriormente, será apresentado o desempenho dos módulos com ventilação híbrida (ventilação natural + ar condicionado) para ambos os climas. E por fim será apresentado um quadro-resumo, com a comparação do consumo total de cada módulo, para verificar qual é o mais econômico.

4.1. Desempenho energético dos módulos com Ar Condicionado

Inicialmente serão apresentados os resultados referentes ao consumo com equipamentos e iluminação, sendo em seguida apresentado o desempenho energético quando ao consumo do ar condicionado. Por último será apresentado o consumo total de energia em cada módulo.

4.1.1. Análise do desempenho geral

Os módulos simulados para cada clima são compostos por duas salas localizadas em lados opostos com um corredor entre elas, conforme descrito no item 3.7.1. As simulações foram realizadas com as portas fechadas e inicialmente com porcentagem de abertura na fachada (PAF) igual a 50%. Os módulos foram orientados a norte/ sul, em seguida a nordeste/sudoeste (São Carlos) e sudeste/noroeste (Natal), e, por fim, a leste/oeste.

Para estas simulações, o modelo estudado apresenta apenas ar condicionado, funcionando durante todo o período de ocupação (segunda à sexta, das 8h às 18h, com *setpoint* de 25°C para resfriamento), não tendo, portanto, a presença da ventilação natural (o que configuraria um sistema híbrido).

Foram obtidas as somas anuais de consumo para os equipamentos, que são iguais para todos os módulos. A carga térmica interna gerada pelos equipamentos é igual a de 38.1 kWh/m²/ano.

Em relação ao consumo elétrico em iluminação artificial, foram obtidos os consumos anuais para cada módulo, em cada clima, conforme apresentado pelas figuras 57 e 58.

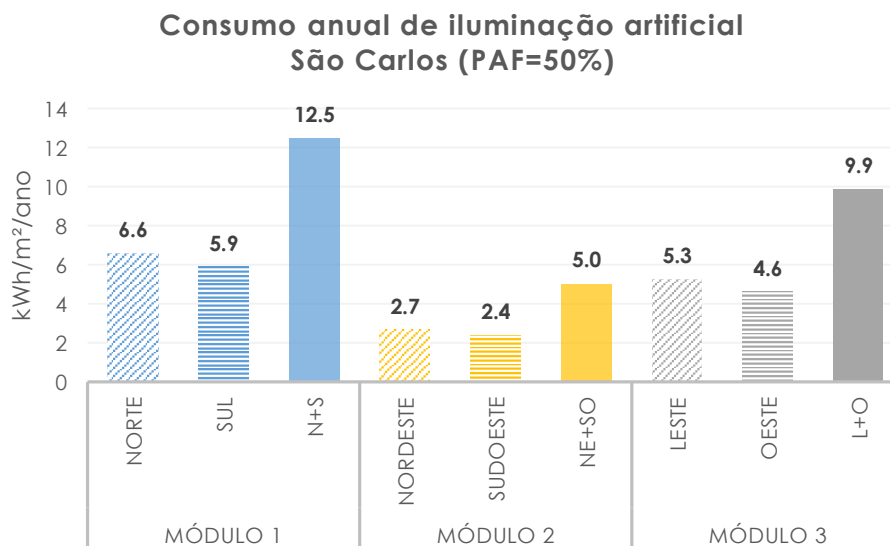


Figura 57: Consumo anual de iluminação artificial nos módulos (PAF=50%) para São Carlos (SP).

Na figura 57 é possível notar o consumo com iluminação artificial em cada módulo para São Carlos (PAF=50%). Como fora supracitado, no *software Daysim*, foi inserido um sistema de controle dimerizável, que se ajusta de acordo com a disponibilidade de iluminação natural, utilizando a iluminação artificial apenas como um complemento e que, de acordo com Rocha e Pereira (2011), tal sistema pode chegar a economizar até 80% de energia elétrica. Assim, é possível verificar que o módulo mais econômico, isto é, o que consome menos energia elétrica com iluminação artificial é o módulo 2, composto por salas localizadas à nordeste/sudoeste. Através da *schedule* gerada pelo *Daysim* (que foi inserida no *EnergyPlus*), foi possível verificar que os horários mais frequentes em que a iluminação artificial foi ligada são sempre após às 16h, permanecendo assim até às 18h.

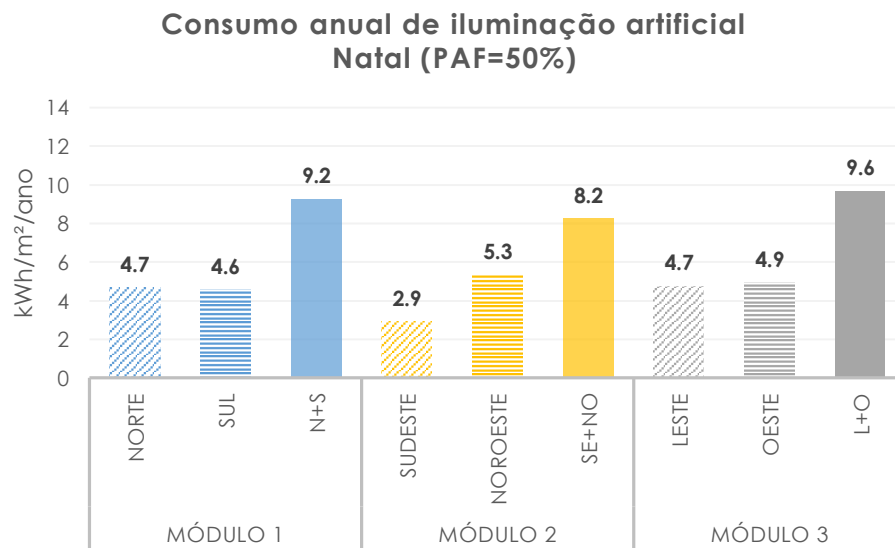


Figura 58: Consumo anual de iluminação artificial nos módulos (PAF=50%) para Natal (RN).

A figura 58 apresenta o consumo de iluminação artificial para os módulos localizados em Natal (PAF=50%), de onde é possível notar que o módulo mais econômico é o módulo 2, composto por salas localizadas à sudeste / noroeste.

Uma questão que não foi considerada na análise da iluminação é a questão do ofuscamento, que possivelmente poderá existir em alguns pontos e horários dos módulos apresentadas neste trabalho, devido à grande área de abertura na fachada. Assim, no escopo deste trabalho considerou-se apenas a disponibilidade de iluminação natural como parâmetro de análise, uma vez que a pesquisa tem um caráter mais abrangente, não sendo exclusivamente sobre iluminação. No entanto, é importante salientar que o conforto visual é caracterizado não apenas através da disponibilidade de luz, natural, mas também pelo ofuscamento.

Dessa forma, as figuras 59 e 60 apresentam o consumo mensal em relação à iluminação artificial para os modelos mais econômicos em ambos os climas, que é o módulo 2.

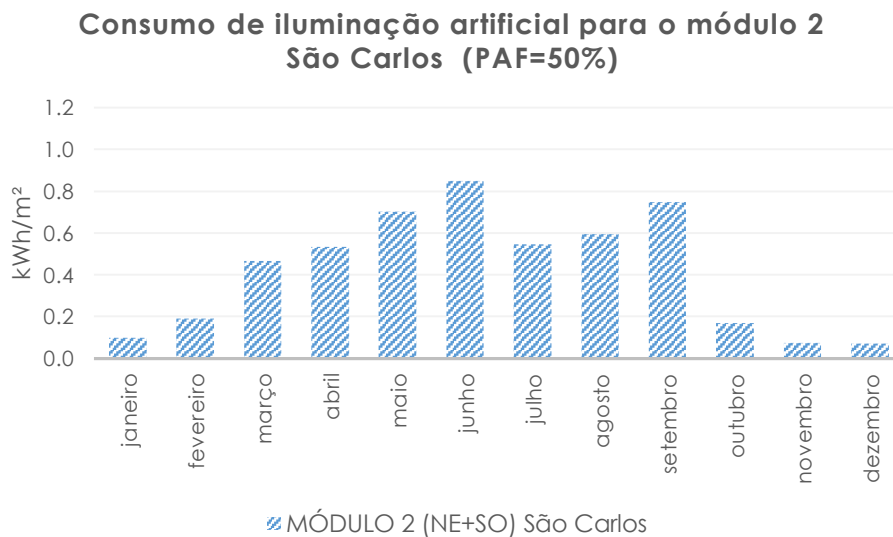


Figura 59: Consumo de iluminação artificial no módulo 2 (PAF=50%) para São Carlos (SP).

Na figura 59, que apresenta o consumo do módulo 2, orientado a nordeste/sudeste em São Carlos (PAF=50%) é possível verificar que há uma tendência a aumentar o consumo com iluminação artificial ao longo do ano, crescendo a partir de março até junho, diminuindo um pouco em julho e aumentando até setembro, quando então decresce bruscamente e tende a se manter bem baixo entre os meses de outubro a fevereiro.

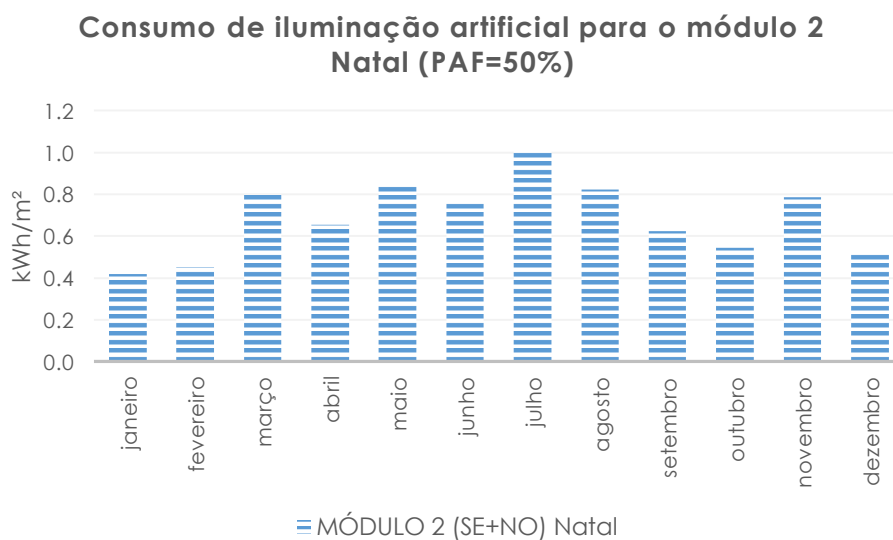


Figura 60: Consumo de iluminação artificial no módulo 2 (PAF=50%) para Natal (RN).

Já a figura 60 apresenta o consumo do módulo 2, orientado a sudeste/noroeste, em Natal (PAF=50%), em que se pode notar que os valores de consumo tendem a se manter mais altos, quando comparados aos de São Carlos, e se mantêm mais altos durante os meses de março a agosto, quando decrescem, sendo que os meses de consumo mais baixos são dezembro, janeiro e fevereiro.

A partir de tais estudos, foram feitas simulações para a cidade de São Carlos, variando-se a porcentagem de abertura na fachada (PAF), de 50% para 30%, a fim de se verificar o consumo com iluminação artificial e ter mais um parâmetro de comparação, além dos resultados de Natal com PAF=50%. Os resultados são apresentados na figura 61.

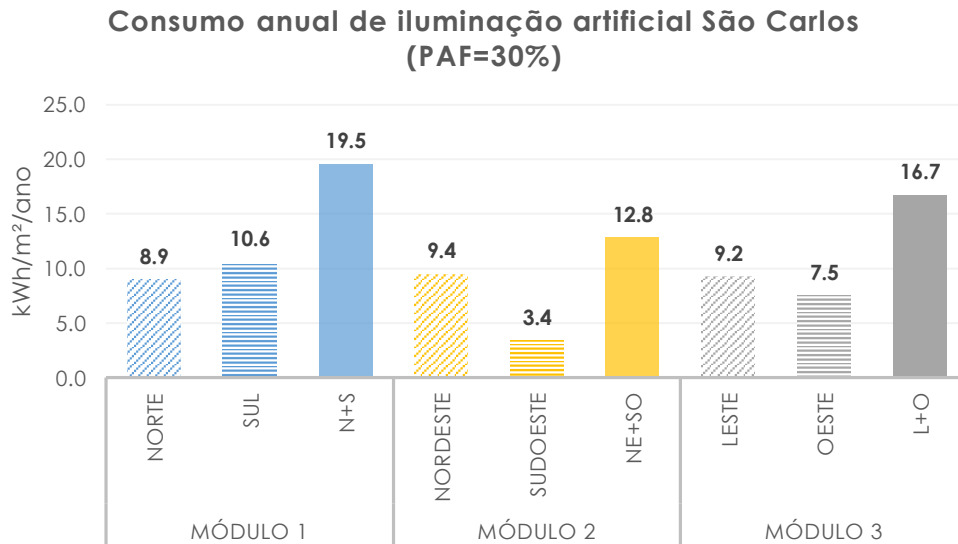


Figura 61: Consumo anual de iluminação artificial nos módulos (PAF=30%) para São Carlos (SP).

A partir da figura 61, pode-se notar que o consumo com iluminação artificial em São Carlos aumentou consideravelmente, se compararmos com os mesmos módulos com PAF=50%, no qual os valores chegaram a 12.5kWh/m²/ano, enquanto que nos módulos com PAF=30% o consumo máximo chegou a 19.5kWh/m². Tal resultado reflete que, quando se reduz o tamanho da janela, também se diminui a disponibilidade de luz natural, que tende a ser menor quanto mais profunda for a sala, exigindo mais da iluminação artificial. Uma comparação é apresentada na tabela 10.

Tabela 10: Comparação de consumo anual com iluminação artificial para São Carlos.

		Comparação consumo anual com iluminação artificial (kWh/m²) São Carlos		
		PAF=50%	PAF=30%	Aumento (%)
MÓDULO 1	NORTE	6.6	8.9	
	SUL	5.9	10.6	
	N+S	12.5	19.5	56.4
MÓDULO 2	NORDESTE	2.7	9.4	
	SUDOESTE	2.4	3.4	
	NE+SO	5.0	12.8	153.9
MÓDULO 3	LESTE	5.3	9.2	
	OESTE	4.6	7.5	
	L+O	9.9	16.7	69.0

A tabela 10 apresenta a comparação dos consumos com iluminação artificial em São Carlos nos módulos com PAF=50% e PAF=30%, demonstrando que há um aumento no consumo com iluminação artificial quando se tem uma redução do PAF. O módulo que teve a maior porcentagem de aumento no consumo é o módulo 2, com 153.9%. Mesmo tendo o maior aumento no consumo da iluminação artificial, o módulo 2 ainda é o mais econômico dos três com PAF=30%, reafirmando a tendência apresentada nos módulos com PAF=50%.

Em relação ao consumo energético advindo do ar condicionado, foram obtidos os resultados para os módulos com PAF=50% para São Carlos e Natal. Os resultados são apresentados nas figuras 62 e 63.

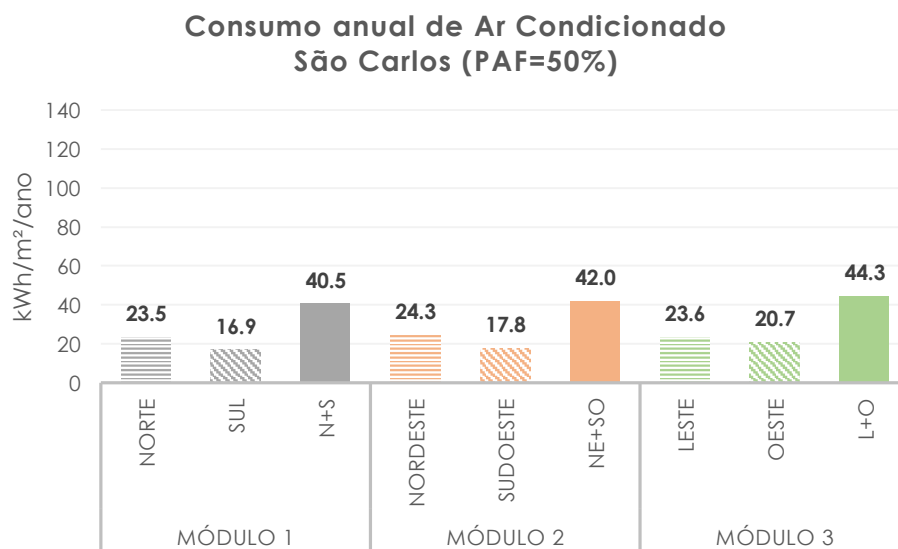


Figura 62: Consumo anual de ar condicionado nos módulos (PAF=50%) para São Carlos (SP).

A figura 62 apresenta os consumos anuais com ar condicionado (funcionando durante todo o período de ocupação com *setpoint* de 25°C para resfriamento) nos módulos com PAF=50% para a cidade de São Carlos, de onde se pode afirmar que o módulo mais econômico é o primeiro, orientado à norte/sul, com um consumo anual total de 40.5kWh/m².

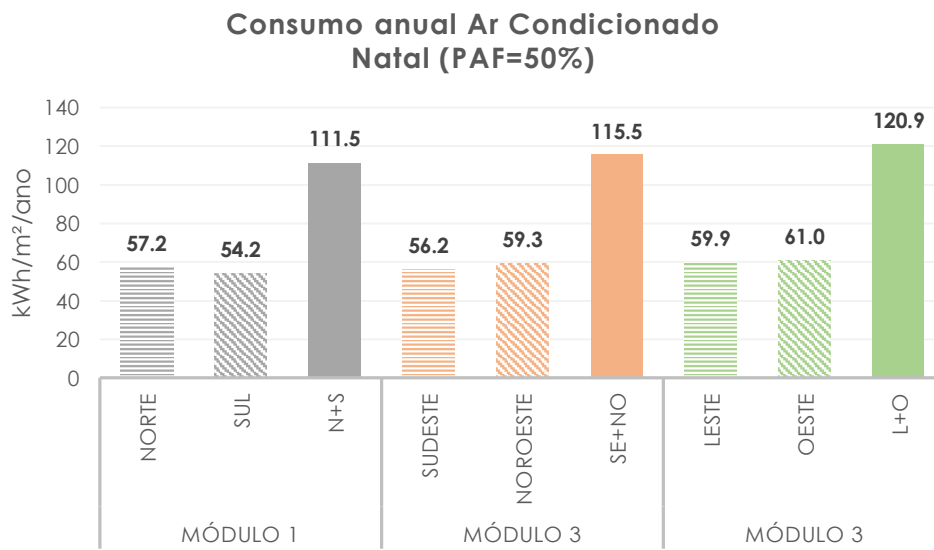


Figura 63: Consumo anual de ar condicionado nos módulos (PAF=50%) para Natal (RN).

Já a figura 63 apresenta o consumo com ar condicionado (funcionando conforme descrição anterior) dos módulos com PAF=50% para Natal, em que se pode observar o módulo mais econômico como sendo o módulo 1, assim como aconteceu com São Carlos. É possível afirmar que tal configuração (norte/sul) acaba apresentando menor consumo por conta do módulo nessa orientação receber menos ganhos solares pelas janelas, exigindo menos do condicionador de ar.

Tais resultados, se comparados aos da iluminação artificial, mostram que nem sempre onde há menor consumo com iluminação, há menor consumo de energia com condicionamento de ar.

Para os módulos mais econômicos em ambos os climas foram obtidos consumos mensais, bem como foram apresentados dias-exemplos de verão e inverno, de modo a se analisar como o módulo 1 se comporta em relação ao condicionamento de ar. Os resultados são apresentados nas figuras 64, 65, 66 e 67.

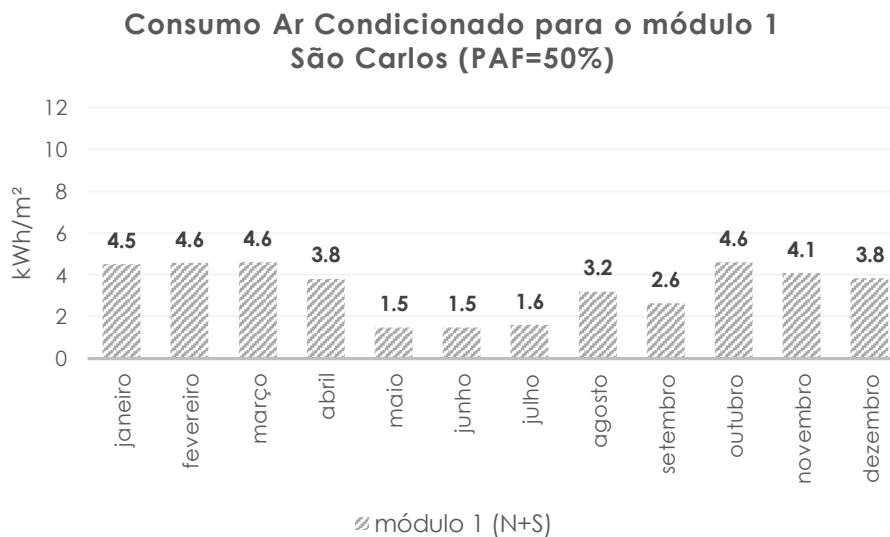


Figura 64: Consumo do ar condicionado no módulo 1 (PAF=50%) para São Carlos (SP).

A figura 64 mostra o consumo com condicionamento de ar ao longo do ano para o módulo 1, em São Carlos (PAF=50%), com valores variando de 1.5kWh/m² a 4.6kWh/m². É possível se observar uma tendência em reduzir o consumo nos meses mais frios (maio, junho e julho) ficando em torno de 1.5kWh/m², enquanto que nos meses mais quentes como janeiro, fevereiro e março esse valor fica em torno de 4.6kWh/m².

A seguir serão apresentados dois dias-exemplos (figuras 65 e 66), sendo um no verão e outro no inverno, na sala norte (módulo 1) para São Carlos, afim de se verificar o comportamento em relação ao condicionador de ar.

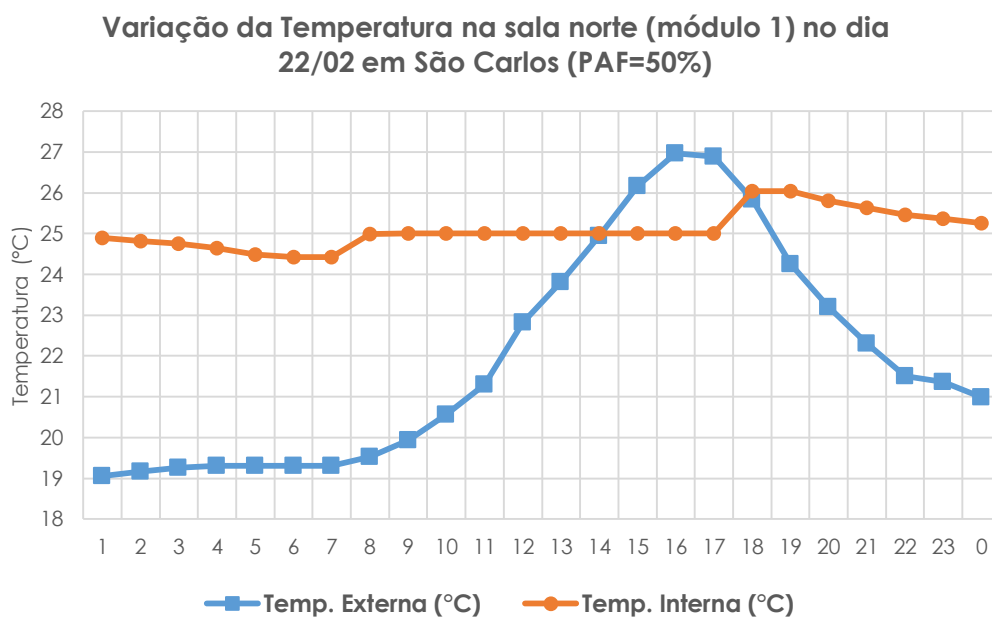


Figura 65: Consumo do ar condicionado na sala norte (módulo 1) dia 22/02 em São Carlos.

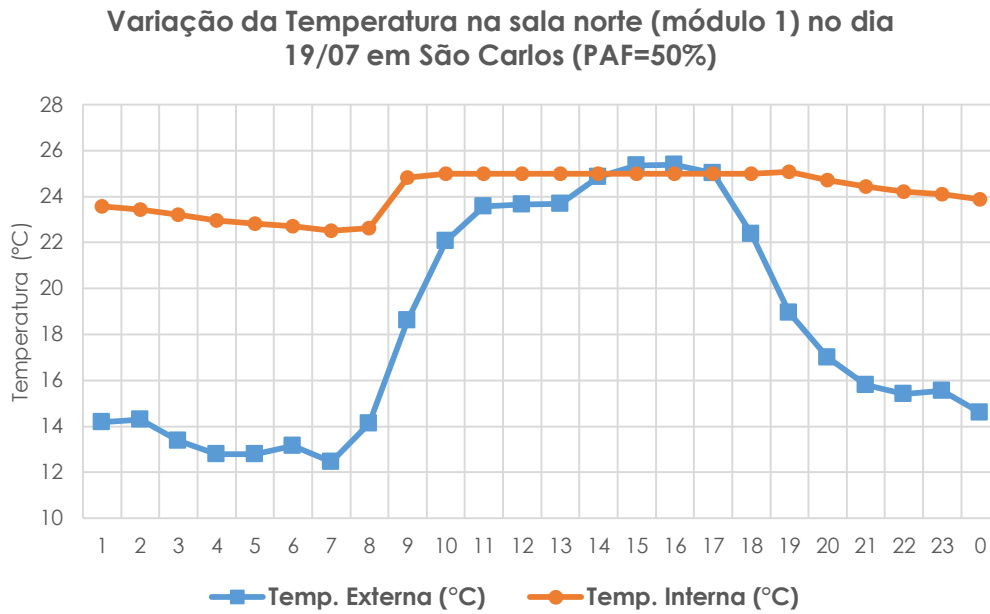


Figura 66: Consumo do ar condicionado na sala norte (módulo 1) dia 19/07 em São Carlos.

Tanto na figura 65 quanto na 66 é possível verificar que quando a temperatura interna atinge os 25°C (às 8h na figura 65 e às 9h na figura 66) o ar condicionado é ligado, permanecendo assim até o final do período de ocupação (às 18h), demonstrando que, mesmo no inverno, o condicionamento de ar também é acionado, haja vista que este é um exemplo de dia (que mostra o padrão do período). Também foram feitas simulações com o *setpoint* para aquecimento de 18°C, mas os resultados foram sempre zero, indicando que o aquecimento para São Carlos, neste caso, não é necessário, já que a temperatura interna das salas não atinge essa temperatura.

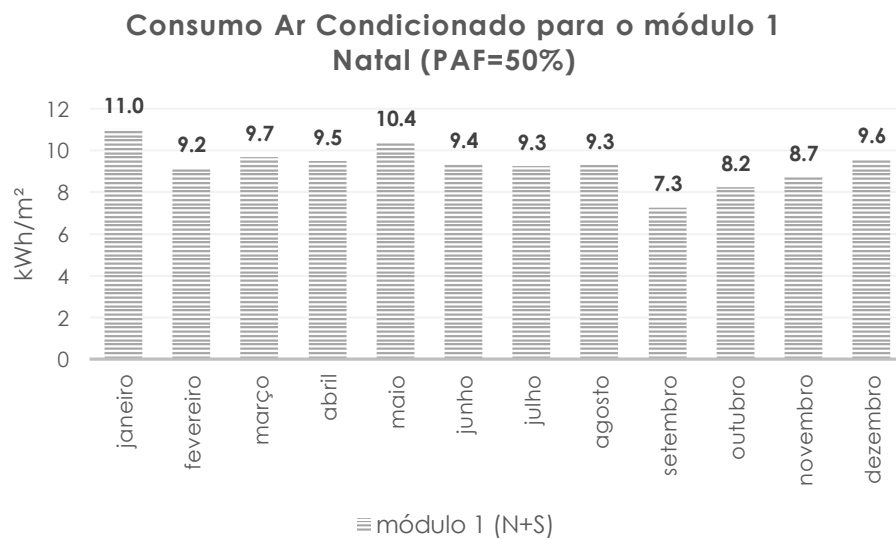


Figura 67: Consumo do ar condicionado no módulo 1 (PAF=50%) para Natal (RN).

Já para Natal, conforme apresentado na figura 67, o módulo 1 com PAF=50% apresenta alto consumo ao longo de todos os meses, variando de 7.3 a 11kWh/m². Tais valores se justificam por Natal se localizar geograficamente numa região mais quente do país (nordeste), se comparado à cidade de São Carlos (sudeste). Em Natal, em dias-exemplo de verão e inverno, o ar condicionado permanece ligado durante o dia todo, em todos os períodos do ano.

Da mesma forma como foi feito com o consumo da iluminação artificial para São Carlos, como método de comparação, foram obtidos resultados do consumo com ar condicionado alterando-se o PAF de 50 para 30%, conforme apresentado na figura 68.

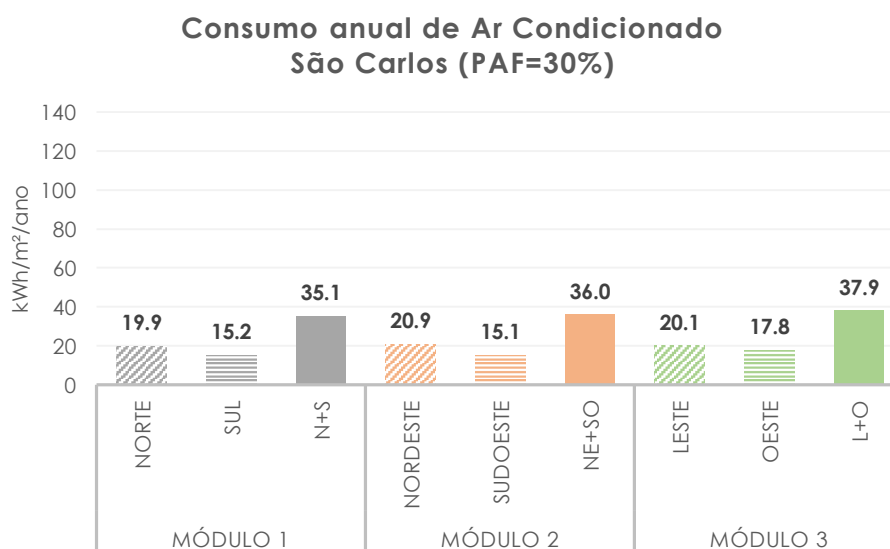


Figura 68: Consumo do ar condicionado nos módulos (PAF=30%) para São Carlos (SP).

Na figura 68 são apresentados os consumos anuais com ar condicionado para todos os módulos com PAF=30% para São Carlos, em que se pode observar que o módulo 1 ainda se apresenta como o mais econômico, da mesma forma que os módulos de PAF=50%. Uma tabela é apresentada com a comparação dos consumos com ar condicionado nos módulos com PAF=50% e PAF=30% (tabela 11).

Tabela 11: Comparação de consumo anual com ar condicionado para São Carlos.

		Comparação consumo anual com ar condicionado (kWh/m ²) São Carlos		
		PAF=50%	PAF=30%	Redução (%)
MÓDULO 1	NORTE	23.5	19.9	
	SUL	16.9	15.2	
	N+S	40.5	35.1	13.4
MÓDULO 2	NORDESTE	24.3	20.9	
	SUDOESTE	17.8	15.1	
	NE+SO	42.0	36.0	14.4
MÓDULO 3	LESTE	23.6	20.1	
	OESTE	20.7	17.8	
	L+O	44.3	37.9	14.4

Na tabela 11 pode-se notar que quando se altera o PAF de 50% para 30% há uma redução no consumo com ar condicionado na faixa de 14%, que é igual para os módulos 2 e 3, enquanto que o módulo 1, o mais econômico em termos de consumo, tem um redução menor quando comparado os valores de PAF iguais a 50 e 30%. O consumo de energia elétrica nos módulos com PAF=30% é menor, se comparado aos módulos com PAF=50%, por conta da redução nos ganhos solares.

4.1.2. Análise do consumo total

Nesse item serão analisados, para ambos os climas, os consumos de energia totais de cada módulo com ar condicionado operando durante todo o período de ocupação (AC) e iluminação natural integrada à artificial por meio de um sistema eficiente (dimerizável). Os resultados são apresentados nas tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12: Consumo total anual nos módulos AC para São Carlos (PAF=50%).

		Consumo em kWh/m²/ano em São Carlos (PAF=50%)			
		Equipamentos	Iluminação artificial	Ar condicionado	Total
AC	MÓDULO 1 (N+S)	38.1	12.5	40.5	91.1
	MÓDULO 2 (NE+SO)	38.1	5	42	85.1
	MÓDULO 3 (L+O)	38.1	9.9	44.3	92.3

A tabela 12 mostra a soma dos consumos de energia para os módulos com ar condicionado em São Carlos (PAF=50%), em que se pode notar que o módulo mais econômico, no total, é o módulo 2. Nas análises feitas para o consumo da iluminação artificial e do ar condicionado, obtiveram-se que os módulos mais econômicos eram, respectivamente, o 2 e o 1. Dessa forma, pode-se afirmar que o consumo com iluminação artificial apresenta-se como um fator determinante nessa soma do consumo total, fazendo com que o módulo 2 seja o de melhor desempenho energético.

A mesma análise é feita para Natal (PAF=50%), conforme apresentada pela tabela 13.

Tabela 13: Consumo total anual nos módulos AC para Natal (PAF=50%).

		Consumo em kWh/m²/ano em Natal (PAF=50%)			
		Equipamentos	Iluminação artificial	Ar condicionado	Total
AC	MÓDULO 1 (N+S)	38.1	9.2	111.5	158.8
	MÓDULO 2 (SE+NO)	38.1	8.2	115.5	161.8
	MÓDULO 3 (L+O)	38.1	9.6	120.9	168.6

Já para Natal, conforme apresentado na tabela 13, os consumos do ar condicionado são sempre muito mais altos, se comparados aos da iluminação artificial, o que faz com que o módulo 1 ainda permaneça como sendo o mais econômico de todos os módulos, principalmente pelo fato de o consumo com ar condicionado ser menor nesse caso.

Como forma de comparação, foram somados os consumos totais para os módulos de PAF=30% para São Carlos, que são apresentados na tabela 14.

Tabela 14: Consumo total anual nos módulos AC para São Carlos (PAF=30%).

		Consumo em kWh/m²/ano em São Carlos (PAF=30%)			
		Equipamentos	Iluminação artificial	Ar condicionado	Total
AC	MÓDULO 1 (N+S)	38.1	19.5	35.1	92.7
	MÓDULO 2 (SE+NO)	38.1	12.8	36	86.9
	MÓDULO 3 (L+O)	38.1	16.7	37.9	92.7

A tabela 14 apresenta a soma dos consumos de energia totais para os módulos com ar acondicionado para São Carlos (PAF=30%). Nesses casos, assim como apresentado na tabela 12, para esse clima, o consumo com iluminação artificial predomina sobre os demais consumos, sendo um fator determinante na economia de energia elétrica, haja vista que todos os módulos com menor consumo energético, no caso o módulo 2, são também os que possuem menor consumo com iluminação artificial.

4.2. Desempenho térmico do módulo com Ventilação Natural

Inicialmente foram obtidas as temperaturas de conforto mensais para cada clima, calculadas conforme a norma ASHRAE 55/2004, com 90% de aceitabilidade, que são apresentadas na tabela 15.

Tabela 15: Faixas de Temperatura de Conforto para São Carlos e Natal.

	FAIXAS DE TEMPERATURA DE CONFORTO (°C)							
	São Carlos (SP)				Natal (RN)			
	Temp. Média Mensal	frio (-2.5)	Temp. conforto	calor (+2.5)	Temp. Média Mensal	frio (-2.5)	Temp. conforto	calor (+2.5)
Janeiro	21.7	22.0	24.5	27.0	27.6	23.9	26.4	28.9
Fevereiro	22.5	22.3	24.8	27.3	27.4	23.8	26.3	28.8
Março	21.6	22.0	24.5	27.0	27.3	23.8	26.3	28.8
Abril	20.5	21.7	24.2	26.7	27.0	23.7	26.2	28.7
Mai	17.2	20.6	23.1	25.6	27.0	23.7	26.2	28.7
Junho	17.4	20.7	23.2	25.7	26.3	23.5	26.0	28.5
Julho	17.6	20.8	23.3	25.8	26.0	23.4	25.9	28.4
Agosto	19.8	21.4	23.9	26.4	26.1	23.4	25.9	28.4
Setembro	19.4	21.3	23.8	26.3	26.7	23.6	26.1	28.6
Outubro	22.3	22.2	24.7	27.2	26.6	23.5	26.0	28.5
Novembro	21.8	22.1	24.6	27.1	27.2	23.7	26.2	28.7
Dezembro	21.7	22.0	24.5	27.0	27.7	23.9	26.4	28.9

A tabela 15 apresenta as temperaturas de conforto para cada mês e clima, de onde se pode observar que as temperaturas de conforto para São Carlos se localizam nas faixas entre 20 e 27°C, enquanto que em Natal essa faixa é mais alta, ficando entre 23 e 29°C.

A partir disso foram feitas análises dos graus-hora (°Ch) de desconforto por frio e por calor para cada módulo e clima, considerando os limites da tabela 12 e supondo-se que a sala apenas fosse suprida pela ventilação natural, funcionando durante todo o período de ocupação (de segunda à sexta-feira, das 8h às 18h) com *setpoint* de 20°C para permitir a ventilação natural (desde que os três requisitos apresentados no item 3.7.3 fossem cumpridos), e não possuísse condicionadores de ar. Os resultados são apresentados na tabela 16.

Tabela 16: Graus-Hora de desconforto anual em cada módulo para São Carlos (PAF=50%).

	Graus-hora de desconforto para São Carlos (PAF=50%) nos períodos de ocupação			
		°Ch calor	°Ch frio	Total
MÓDULO 1	NORTE	2179	118	
	SUL	995	1099	
	N+S	3174	1218	
MÓDULO 2	SUDESTE	2884	708	
	NORDESTE	2412	551	
	SE+NO	5297	1259	
MÓDULO 3	LESTE	2763	238	
	OESTE	1482	1169	
	L+O	4245	1408	

A tabela 16 apresenta as análises de graus-hora de desconforto por frio e calor para os módulos em São Carlos (PAF=50%), em que se pode notar que o desconforto por calor chega a ser três vezes maior que por frio. O módulo menos desconfortável é o módulo 1, com

orientação norte/sul e 4391°Ch de desconforto total anual, enquanto que o mais desconfortável é o módulo 2, com 6555°Ch.

Tabela 17: Graus-Hora de desconforto anual em cada módulo para Natal (PAF=50%).

Graus-hora de desconforto para Natal (PAF=50%)				
		°Ch calor	°Ch frio	Total
MÓDULO 1	NORTE	17463	0	
	SUL	15115	0	
	N+S	32578	0	32578
MÓDULO 2	SUDESTE	16207	0	
	NOROESTE	23917	0	
	SE+NO	40124	0	40124
MÓDULO 3	LESTE	13684	0	
	OESTE	22007	0	
	L+O	35691	0	35691

Já em Natal (com PAF=50%), conforme apresentado pela tabela 17, pode-se observar que não há desconforto algum por frio, enquanto que, por calor há um valor bem alto, se comparado com São Carlos, uma vez que neste clima o módulo com maior desconforto chega a 6555 °Ch, enquanto que em Natal chega a 40124°Ch, sendo seis vezes maior que o primeiro.

Em seguida foram obtidos os resultados para comparação dos módulos naturalmente ventilados, de PAF=50% e PAF=30% em São Carlos, que são apresentados na tabela 18.

Tabela 18: Graus-Hora de desconforto anual em cada módulo para São Carlos (PAF=30%).

Graus-hora de desconforto para São Carlos (PAF=30%)				
		°Ch calor	°Ch frio	Total
MÓDULO 1	NORTE	1746	78	
	SUL	873	802	
	N+S	2619	879	3498
MÓDULO 2	NORDESTE	2416	122	
	SUDOESTE	1118	900	
	NE+SO	3535	1021	4556
MÓDULO 3	LESTE	2354	552	
	OESTE	1932	358	
	L+O	4286	910	5195

Na tabela 18 são apresentados os resultados obtidos para os módulos com PAF=30% em São Carlos, demonstrando que a o módulo menos desconfortável é o módulo 1, seguindo a mesma tendência apresentada no módulo com PAF=50%. O que não acontece com o módulo com maior desconforto, que com PAF=50% era o módulo 2 e no modelo com PAF=30% é o módulo 3. Uma questão importante a ser ressaltada é a de que, comparando-se os resultados com PAF=50%, quando se tem uma redução no tamanho da janela, o desconforto também é menor, por conta da diminuição dos ganhos de calor solares.

Dessa forma, serão apresentados os graus-hora de desconforto mensal no módulo 1 em São Carlos e em Natal (PAF=50%), nas figuras 69 e 70.

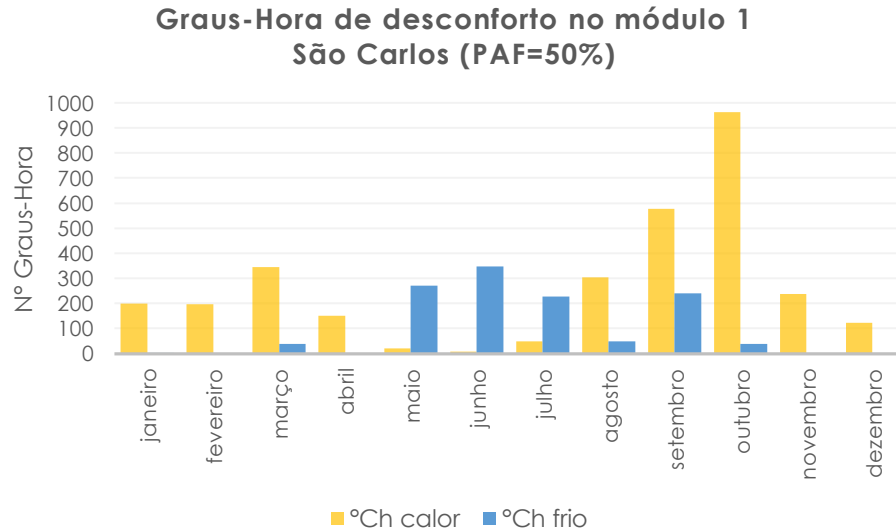


Figura 69: Graus-Hora de desconforto no módulo 1 (PAF=50%) em São Carlos (SP).

A figura 69 apresenta os graus-hora de desconforto no módulo 1 em São Carlos (PAF=50%), simulado apenas com ventilação natural, de modo que se pode observar na análise dos dados que há os maiores graus-hora de frio nos meses de maio, junho e julho, enquanto que os maiores graus-hora de calor se situam entre os meses de setembro e outubro. Os graus-hora de frio se apresentam por conta de que, na análise da temperatura de conforto, as temperaturas por volta dos 20°C (temperatura de acionamento da ventilação natural) se apresentam como frias, o que não quer dizer, necessariamente, que seja preciso a utilização de aquecimento para este local.

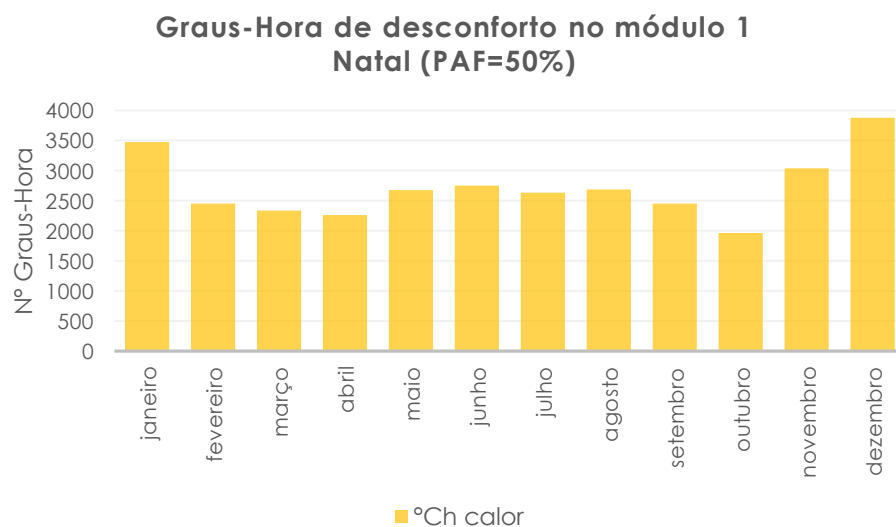


Figura 70: Graus-Hora de desconforto no módulo 1 (PAF=50%) em Natal (RN).

Já a figura 70 apresenta os graus-hora de desconforto para Natal (PAF=50%), evidenciando altos índices de desconforto por calor ao longo do ano todo, sem muita variação. Tal resultado afirma que, para este clima, é necessário que haja a utilização de condicionadores de ar, a fim de se reduzir essa taxa de desconforto.

A figura 71 apresenta os graus-hora de desconforto para o módulo 1, em São Carlos, com PAF=30%, demonstrando a mesma tendência apresentada pela análise no módulo 1 com PAF=50%, porém com menores valores de desconforto, tendência que pode ser explicada pelo fato de que, reduzindo-se o tamanho da janela, os ganhos de calor solares também diminuem, causando um desconforto menor.

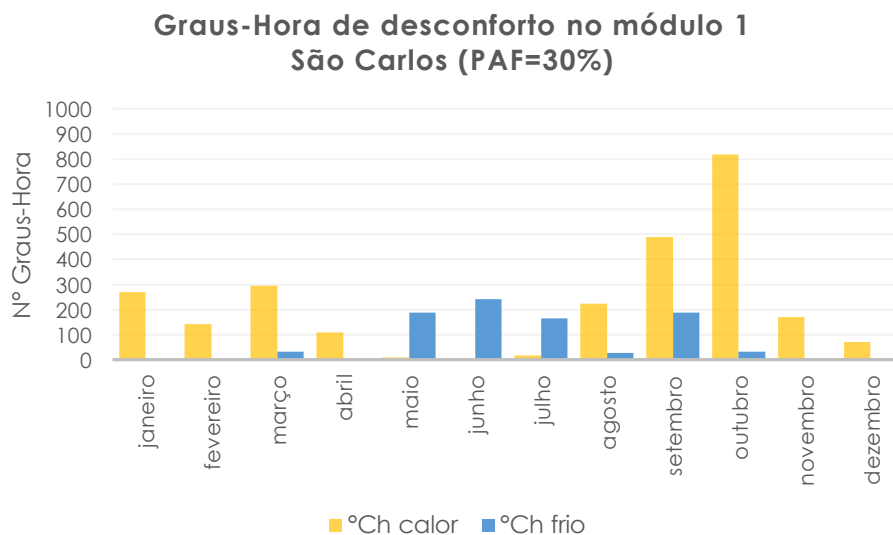


Figura 71: Graus-Hora de desconforto no módulo 1 (PAF=30%) em São Carlos (SP).

Tendo em vista tais resultados, é possível se concluir alguns aspectos: para a cidade de São Carlos, como a temperatura de conforto se situa na faixa dos 24°C, valores abaixo deste são considerados, de acordo com índice de conforto selecionado para este estudo, como desconforto por frio. Como utilizou-se uma temperatura para ventilação natural de 20°C, isto justifica o aparecimento de tantos graus-hora de desconforto por frio. Mesmo assim, esse “desconforto por frio” ainda assume valores bem menores do que o desconforto por calor.

Já em relação à Natal, tem-se que os graus-hora de desconforto por calor são muito elevados e não há graus-hora de frio, por conta das altas temperaturas. A temperatura externa está acima do limite superior de conforto em grande parte do ano, causando este desconforto por calor tão acentuado.

Ao mesmo tempo, para São Carlos também são encontrados muitos graus-hora de desconforto por calor, fato este que justifica a utilização do condicionador de ar neste clima, assim como para Natal.

4.3. Desempenho energético dos módulos com Ventilação Híbrida

Neste item será apresentada uma análise geral do desempenho energético dos módulos com ventilação híbrida e em seguida será apresentado o consumo total de energia elétrica em cada módulo.

4.3.1. Análise do desempenho geral

Aplicou-se nos módulos adotados neste estudo a estratégia de ventilação híbrida, que funcionaria de segunda à sexta, de 8h às 18h.

Conforme configurações descritas no item 3.7.5, a estratégia de ventilação híbrida utilizada é a alternada, isto é, quando a ventilação natural está funcionando, o ar condicionado está desligado, e vice-versa. A partir da configuração por *schedules*, quando a temperatura interna da sala atinge os 20°C (e as demais condições são atendidas, conforme descrito no item 3.7.3.), as janelas são abertas para permitir que a ventilação natural entre no ambiente. Quando a temperatura interna atinge os 25°C, as janelas são fechadas e o ar condicionado é ligado, de modo a manter a temperatura em torno dos 25°C até o final do expediente.

As figuras 72 e 73 apresentam o comportamento da sala norte (módulo 1) com PAF=50%, num dia-exemplo de verão no ano (20/02), para a cidade de São Carlos, em que a ventilação híbrida funciona. A figura 72 apresenta a variação das temperaturas (interna e externa) e a figura 73 apresenta as renovações de ar por hora ao longo do dia considerado.

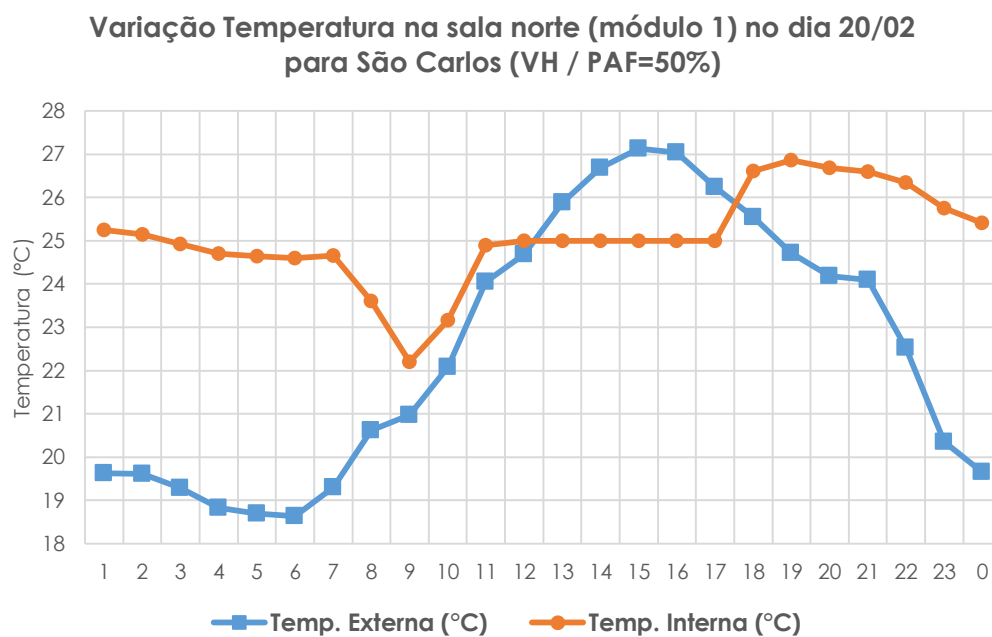


Figura 72: Variação da Temperatura ao longo de um dia-exemplo de verão (20/02) com ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).

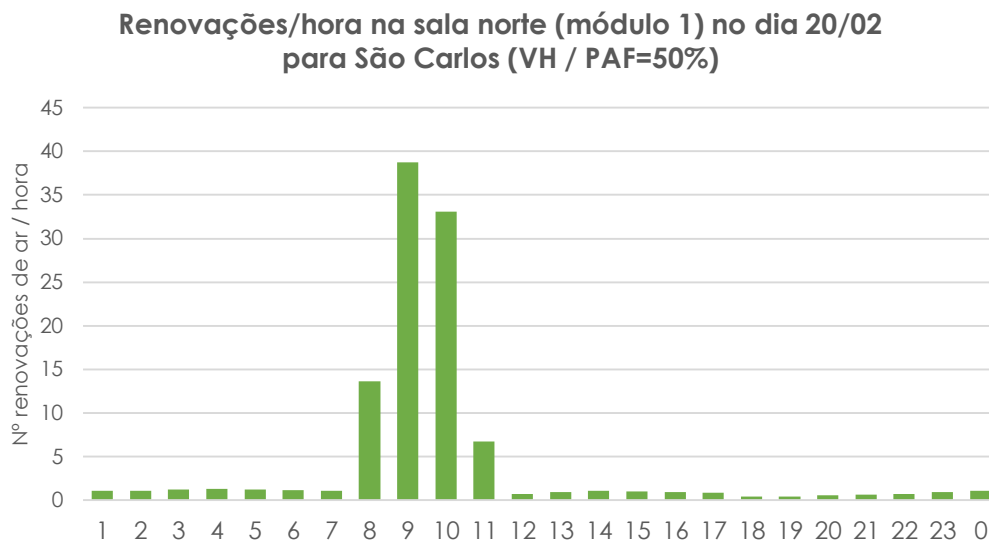


Figura 73: Renovações de ar por hora ao longo de um dia-exemplo de verão (20/02) com ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).

Através das figuras 72 e 73 é possível notar que antes do no início do horário de ocupação (antes das 8h) as janelas estão fechadas (cerca de 1 ren/h) e assim permanecem até às 8h, quando são abertas (15 ren/h), e a temperatura interna está por volta dos 23°C, aumentando depois disso até atingir os 25°C por volta das 11h (acionamento do ar condicionado), quando então as renovações de ar por hora reduziram drasticamente de 25 para 3 e em seguida se mantiveram por volta de 1 renovação/hora (janelas fechadas) até o final do dia. As temperaturas mantiveram-se dentro dos 25°C das 11h até às 17h, quando então o ar condicionado passou a ser desligado e as temperaturas internas passaram a aumentar instantaneamente.

As figuras 74 e 75 mostram um dia típico de inverno em São Carlos (19/07) na sala norte (módulo 1 / PAF=50%), que se pode observar que a ventilação natural é permitida das 8h às 14h, quando então a temperatura interna atinge os 25°C e o ar condicionado é ligado e permanece assim até às 18h. A figura 74 mostra a variação das temperaturas (interna e externa) e a figura 75 mostra as renovações de ar por hora ao longo do dia.

Variação Temperatura na sala norte (módulo 1) no dia 19/07 para São Carlos (VH / PAF=50%)

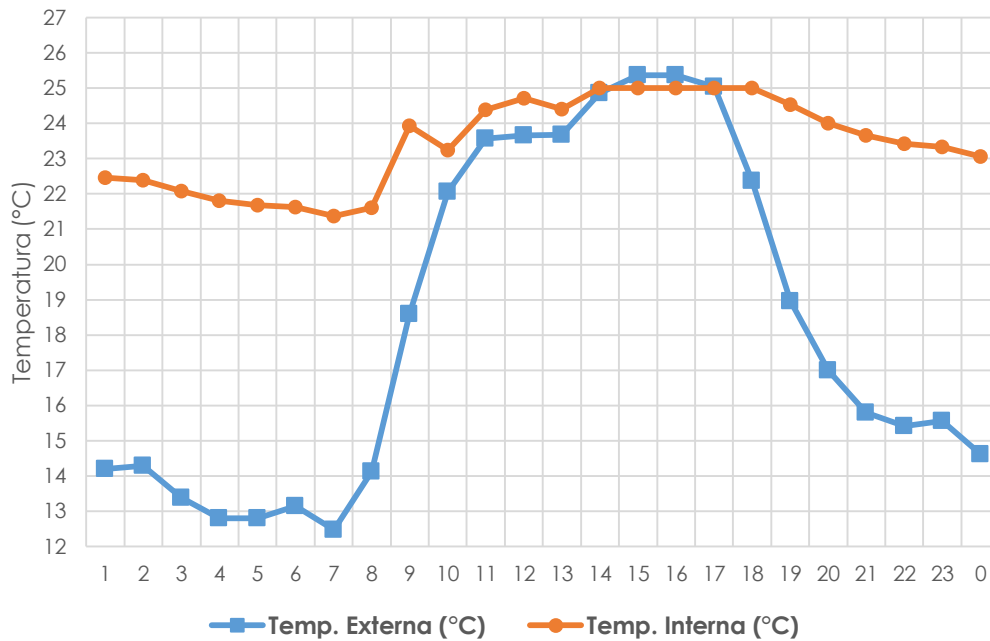


Figura 74: Variação da Temperatura ao longo de um dia-exemplo de inverno (19/07) com ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).

Renovações/hora na sala norte (módulo 1) no dia 19/07 para São Carlos (VH / PAF=50%)

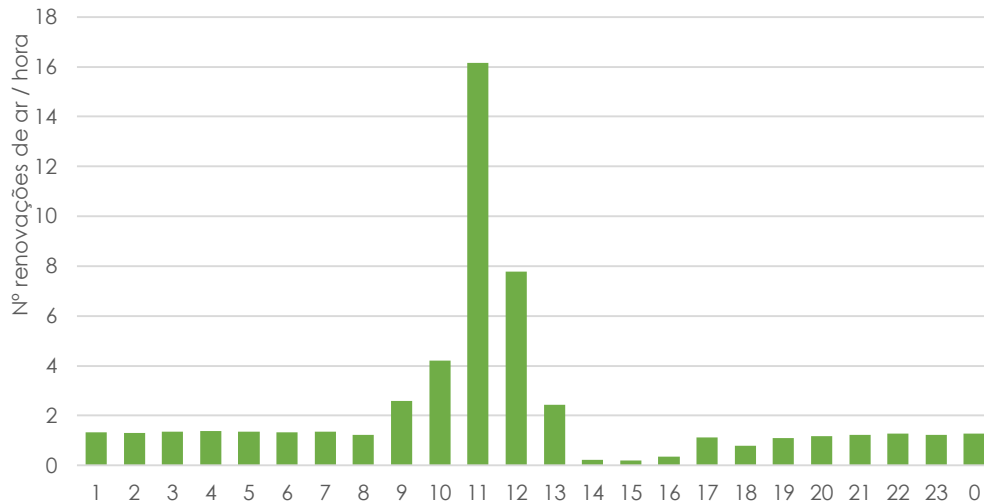


Figura 75: Renovações de ar por hora ao longo de um dia-exemplo de inverno (19/07) com ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).

Dessa forma, pode-se observar que as *schedules* funcionam, de modo que quando a temperatura interna da sala atingir 20°C, as janelas são abertas para permitir a ventilação natural e, ao atingir os 25°C, as janelas se fecham e o ar condicionado é ligado. Mesmo no inverno, muitas vezes o ar condicionado é acionado, mas somente no meio para o final do

dia, quando a sala torna-se muito quente, a temperatura exterior aumenta significativamente e a ventilação natural passa a não ser mais suficiente.

A princípio foram utilizados as mesmas temperaturas de *setpoints* em São Carlos e Natal (20°C para ventilação natural e 25°C para resfriamento do ar condicionado), porém, enquanto em São Carlos a ventilação híbrida funcionou e as janelas abriram, em Natal não aconteceu o mesmo e as janelas permaneceram fechadas o ano todo, com o ar condicionado funcionando durante todo o período de ocupação, uma vez que as temperaturas internas eram sempre mais altas que 25°C. Dessa forma, foi preciso adotar outras temperaturas de *setpoint*, baseadas então na faixa de temperaturas de conforto para o clima de Natal, que foi apresentada no item 4.2, (tabela 12), de onde se pode obter que a faixa de conforto para Natal localiza-se entre 23 e 29°C, justificando o fato da ventilação híbrida, num primeiro momento não funcionar para este clima.

Dessa forma, novas simulações foram feitas, alterando-se o *setpoint* de resfriamento de 25°C para 27°C, e o de ventilação de 20°C para 22°C, de maneira a verificar se a ventilação híbrida funcionaria para o clima de Natal.

Foi feita uma análise comparativa para Natal (PAF=50%) entre os resultados do consumo anual do ar condicionado para os módulos com ventilação híbrida dos módulos apenas com ar condicionado, que são apresentados na tabela 19.

Tabela 19: Consumo do ar condicionado quando utilizado em conjunto com a ventilação natural (ventilação híbrida) em Natal.

Comparação consumo anual Ar Condicionado (kWh/m²/ano) com ventilação híbrida para Natal (PAF=50%)				
		AC	VH	REDUÇÃO (%)
MÓDULO 1	NORTE	57.2	49.6	
	SUL	54.2	43.6	
	N+S	111.5	93.1	
MÓDULO 2	LESTE	56.2	47.8	
	OESTE	59.3	49.4	
	L+O	115.5	97.2	
MÓDULO 3	SUDESTE	59.9	51.5	
	NOROESTE	61.0	51.1	
	SE+NO	120.9	102.6	

A tabela 19 apresenta os resultados de comparação dos consumos nos modelos com ar condicionado e com ventilação híbrida para Natal (PAF=50%), em que se pode notar que houve uma redução no consumo com ar condicionado quando se tem um sistema híbrido, ficando esse valor variando de 15.2 a 16.5% e reafirmando que o módulo que consome menos e economiza mais é o módulo 1. Tal tendência de redução pode ser explicada pelo fato de que em Natal a velocidade dos ventos é maior que em São Carlos, então mesmo abrindo poucas vezes a janela, já é suficiente para resfriar um pouco o ambiente interno.

A partir disso, foram obtidas as porcentagens de horários ocupados em que as janelas ficaram abertas durante o ano todo para ambos os climas. Tais resultados são apresentados na tabela 20.

Tabela 20: Porcentagem de horas ocupadas que a janela ficou aberta em São Carlos e Natal.

		% horas ocupadas com a janela aberta		
		São Carlos PAF=50%		Natal PAF=50%
MÓDULO 1	NORTE	27.9	NORTE	0.1
	SUL	30.8	SUL	0.3
	N+S	58.7	N+S	0.4
MÓDULO 2	NORDESTE	26.1	SUDESTE	0.4
	SUDOESTE	30	NOROESTE	0.5
	NE+SO	56.1	SE+NO	0.9
MÓDULO 3	LESTE	28.1	LESTE	0.3
	OESTE	26.4	OESTE	0.1
	L+O	54.5	L+O	0.4

Através da tabela 20 é possível verificar que, mesmo alterando as temperaturas de *setpoint* para Natal, as janelas abrem bem pouco, se comparado com São Carlos.

Variação Temperatura na sala norte (módulo 1) no dia 20/02 para Natal (VH / PAF=50%)

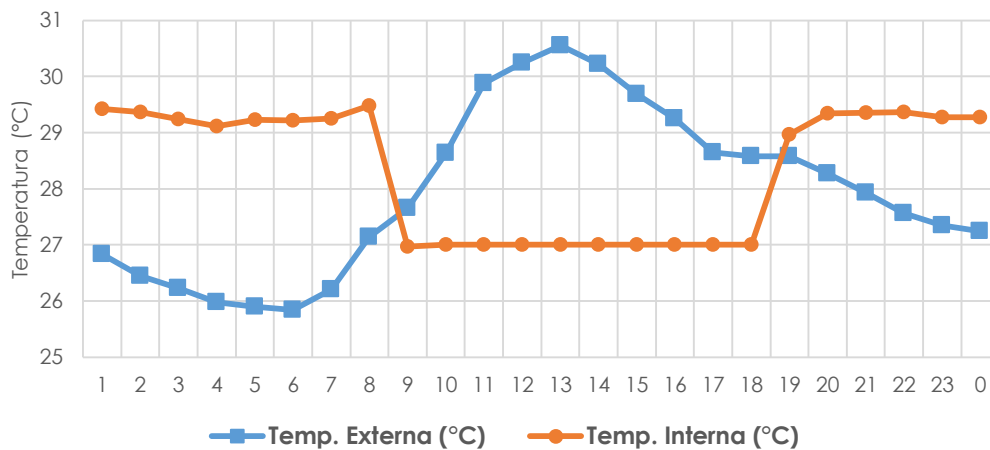


Figura 76: Variação da Temperatura ao longo do dia 20/02 com ventilação híbrida em Natal (PAF=50%)

Variação Temperatura na sala norte (módulo 1) no dia 19/07 para Natal (VH / PAF=50%)

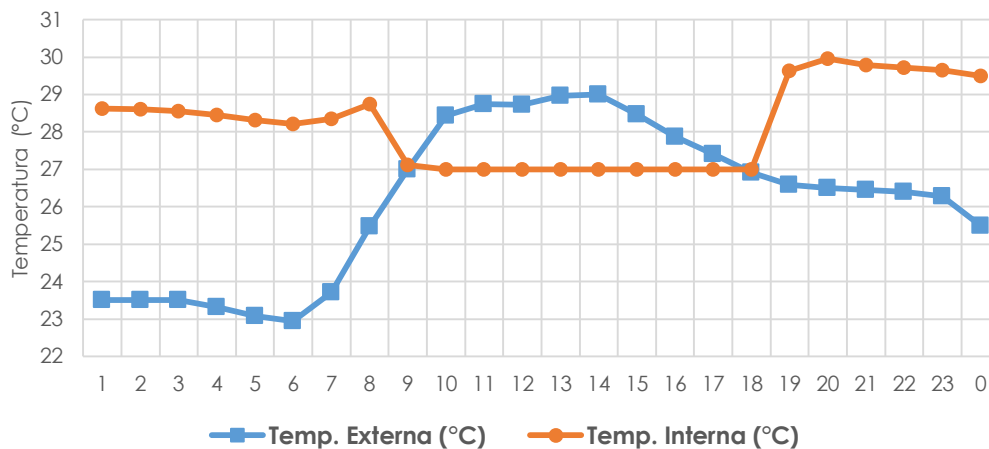


Figura 77: Variação da Temperatura ao longo do dia 19/07 com ventilação híbrida em Natal (PAF=50%)

Tal resultado também se confirma nas figuras 76 e 77, que apresentam os dias 20/02 e 19/07 com ventilação híbrida na sala norte (módulo 1) em Natal, demonstrando que o ar condicionado está sempre ligado, o que pode denotar que o sistema híbrido para este clima, neste caso, não seria adequado. Assim, as próximas análises serão feitas apenas para São Carlos.

Em relação ao consumo energético com condicionamento de ar para São Carlos, no modelo com ventilação híbrida, os resultados são apresentados na figura 78.

Consumo anual de Ar Condicionado São Carlos (VH / PAF=50%)

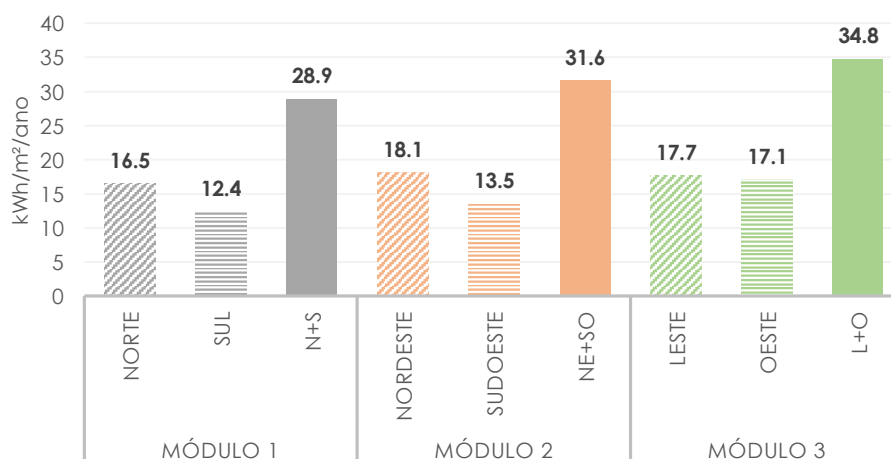


Figura 78: Consumo anual com ar condicionado no modelo de ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).

A figura 78 apresenta o consumo do ar condicionado nos módulos com ventilação híbrida e PAF=50% em São Carlos. É possível observar que o módulo mais econômico, isto é, que possui o menor consumo com ar condicionado é o módulo 1, seguindo a mesma

tendência dos resultados apresentados para os módulos simulados apenas com ar condicionado, sem ventilação natural. Tal tendência pode ser explicada pela orientação do módulo 1 (norte/sul), o qual pode receber menos ganhos solares diretos, se comparados ao pior caso, que seria o módulo 3, com orientação leste/oeste.

Também foram feitas simulações nos mesmos módulos com ventilação híbrida para São Carlos, alterando-se o PAF de 50% para 30%, cujos resultados são mostrados na figura 79.

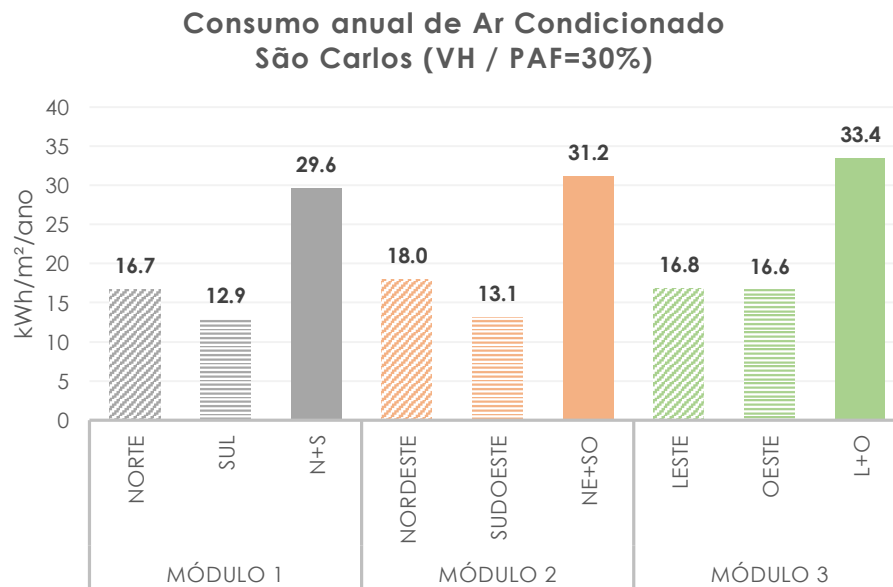


Figura 79: Consumo anual com ar condicionado no modelo de ventilação híbrida em São Carlos (PAF=30%).

A figura 79 mostra o consumo do ar condicionado nos módulos com ventilação híbrida e PAF=30% em São Carlos, na qual se pode observar que o módulo 1 ainda é o mais econômico em relação aos demais, tendência esta que vem se repetindo nas análises anteriores.

A partir de tais resultados foram obtidos os consumos mensais ao longo de um ano para o módulo 1 (mais econômico) com PAF=50% e PAF=30%, que serão apresentados nas figuras 80 e 81.

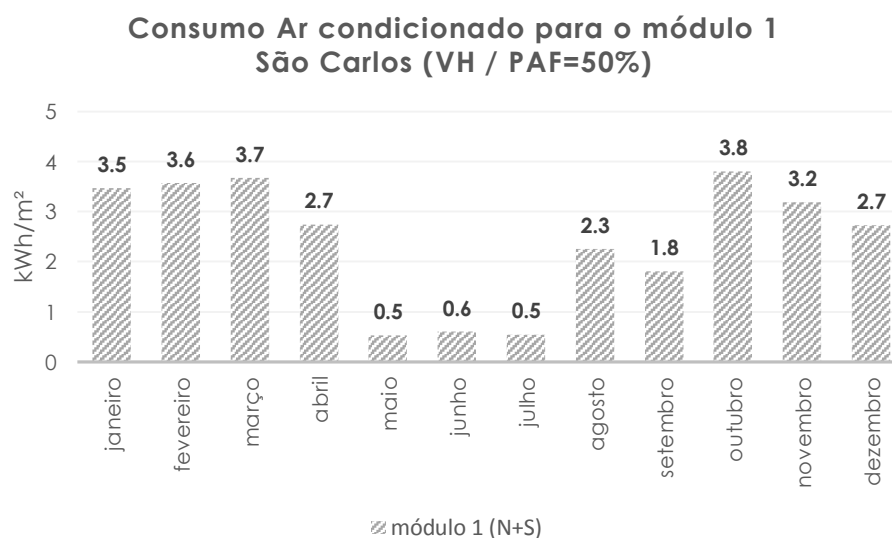


Figura 80: Consumo anual com ar condicionado no módulo 1 de ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%).

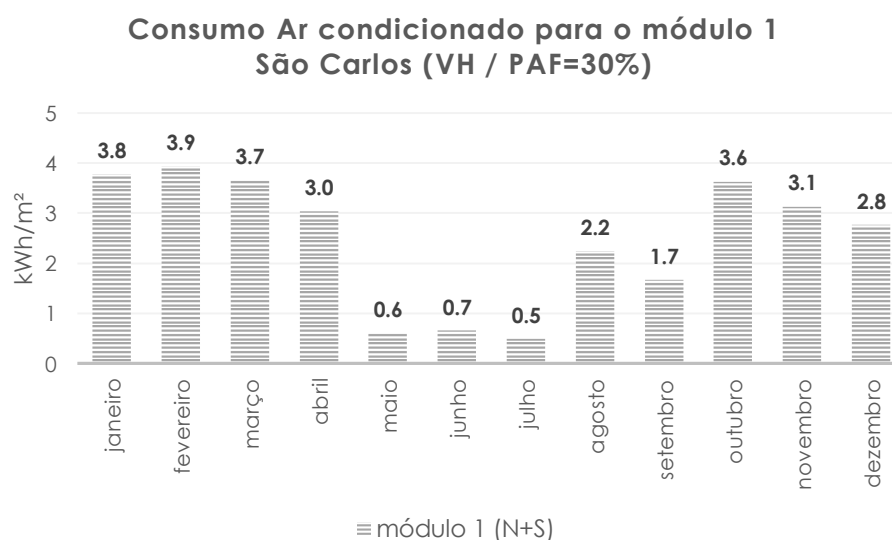


Figura 81: Consumo anual com ar condicionado no módulo 1 de ventilação híbrida em São Carlos (PAF=30%).

As figuras 80 e 81 mostram o consumo com ar condicionado para o módulo 1 (ventilação híbrida, PAF=50 e 30%), que demonstram uma mesma tendência de aumento no consumo nos meses mais quentes, como janeiro, fevereiro e março, reduzindo esse valor nos meses mais frios, em maio, junho e julho e aumentando novamente nos meses seguintes. A diferença entre os módulos com PAF=50% e PAF=30% é o aumento do consumo com ar condicionado, por conta da diminuição no tamanho da janela.

Os resultados do consumo anual do ar condicionado obtidos dos módulos com apenas ar condicionado e dos com ventilação híbrida são dispostos na tabela 21.

Tabela 21: Consumo do ar condicionado quando utilizado em conjunto com a ventilação natural (ventilação híbrida) em São Carlos.

Comparação consumo anual Ar Condicionado (kWh/m²/ano) com ventilação híbrida para São Carlos (PAF=50%)				
		AC	VH	REDUÇÃO (%)
MÓDULO 1	NORTE	23.5	16.5	28.6
	SUL	16.9	12.4	
	N+S	40.5	28.9	
MÓDULO 2	LESTE	24.3	18.1	24.8
	OESTE	17.8	13.5	
	L+O	42.0	31.6	
MÓDULO 3	NORDESTE	23.6	17.7	21.5
	SUDOESTE	20.7	17.1	
	NE+SO	44.3	34.8	

Através da tabela 21 é possível notar a redução no consumo do ar condicionado quando se insere a ventilação híbrida, causando reduções que variam de 21.5 a 28.6% nos módulos. A maior redução se apresenta no módulo 1, com orientações norte/sul, as quais também apresentaram os menores consumos de energia, apresentando a mesma tendência observada nos resultados anteriores.

Como meio de comparação, o consumo do ar condicionado nos módulos com ventilação híbrida para São Carlos, com PAF=50% e PAF=30%, são apresentados na tabela 22.

Tabela 22: Consumo do ar condicionado quando utilizado em conjunto com a ventilação natural (ventilação híbrida) em São Carlos.

Comparação consumo anual com ar condicionado (kWh/m²) nos módulos com ventilação híbrida em São Carlos				
		PAF=50%	PAF=30%	Comparação
MÓDULO 1	NORTE	16.5	16.7	+ 2.4%
	SUL	12.4	12.9	
	N+S	28.9	29.6	
MÓDULO 2	NORDESTE	18.1	18.0	- 1.3%
	SUDOESTE	13.5	13.1	
	NE+SO	31.6	31.2	
MÓDULO 3	LESTE	17.7	16.8	- 3.9%
	OESTE	17.1	16.6	
	L+O	34.8	33.4	

A tabela 22 apresenta os resultados obtidos do consumo do ar condicionado nos módulos com ventilação híbrida em São Carlos, comparando os módulos com PAF=50% e com PAF=30%. Tais resultados demonstram que os valores de consumo do ar condicionado para ambas as situações é muito semelhante, tendo um aumento de 2.4% no módulo 1 e redução nos demais, sendo de 1.3% no módulo 2 e 3.9% no módulo 3. O fato de o módulo 3 ter a maior redução no consumo pode ser por conta da orientação do módulo (leste/oeste)

que gera grande ganho solar direto e que aliado à redução do tamanho da janela (de 50 para 30%), pode reduzir o consumo com o ar condicionado.

Outra análise a ser apresentada para São Carlos, com base nos resultados dos graus-hora de desconforto para os módulos naturalmente ventilados, são comparações destes resultados com os obtidos nos módulos com ventilação híbrida, de modo a verificar se os últimos também podem promover um melhor conforto térmico, ao mesmo tempo que auxiliam na redução do consumo de energia. O método utilizado para essa análise é o mesmo utilizado para o módulo naturalmente ventilado (ASHRAE 55/2004), afim de se obter valores de comparação. Dessa forma, foi feita uma comparação de acordo com as horas ocupadas no ano (2791 horas) dos resultados de NV (naturalmente ventilado) com os de VH (ventilação híbrida). Os resultados são apresentados na tabela 23.

Tabela 23: Comparação da porcentagem de horas ocupadas em desconforto para São Carlos (PAF=50%).

		% horas ocupadas em desconforto para São Carlos (PAF=50%)				
		VN		VH		Redução (%)
		°Ch Total	% horas/ano	°Ch Total	% horas/ano	
MÓDULO 1	NORTE	2297		482		
	SUL	2094		609		
	N+S	4391	78.7	1091	19.5	75.2
MÓDULO 2	NORDESTE	3001		730		
	SUDOESTE	2651		815		
	NE+SO	5652	101.3	1545	27.7	72.7
MÓDULO 3	LESTE	3592		1197		
	OESTE	2963		794		
	L+O	6555	117.4	1991	35.7	69.6

A tabela 23 apresenta a porcentagem de horas com desconforto anual em São Carlos (PAF=50%), para os módulos VN e HV, mostrando que há uma diferença significativa nos resultados, haja vista que para os mesmos módulos, alterando-se o padrão de VN para HV alcançou-se uma redução de até 75% nos graus-hora de desconforto. E o módulo com maior redução e menor horas de desconforto é o módulo 1, seguindo a tendência dos resultados anteriores.

Também foram analisados os dados obtidos com as simulações de PAF=30%, conforme apresentado na tabela 24.

Tabela 24: Comparação da porcentagem de horas ocupadas em desconforto para São Carlos (PAF=30%).

		% horas ocupadas em desconforto para São Carlos (PAF=30%)				
		VN		VH		
		°Ch Total	% horas/ano	°Ch Total	% horas/ano	Redução (%)
MÓDULO 1	NORTE	1824	62.7	225	10.2	83.8
	SUL	1674		343		
	N+S	3498		568		
MÓDULO 2	NORDESTE	2538	81.6	454	16.0	80.3
	SUDOESTE	2018		442		
	NE+SO	4556		896		
MÓDULO 3	LESTE	2905	93.1	737	20.5	78.0
	OESTE	2290		408		
	L+O	5195		1145		

A tabela 24 apresenta a mesma tendência de resultados da anterior, em que o módulo menos desconfortável ainda é o primeiro, com 62.7% das horas ocupadas no ano em desconforto, nos módulos VN, e 10.2% das horas nos módulos HV. A redução, nesse caso, é ainda maior, chegando a atingir os quase 84%.

Dessa forma, de acordo com os resultados expostos, é possível afirmar que a utilização das estratégias de ventilação híbridas são importantes no sentido de se reduzir os graus-hora de desconforto nos ambientes internos, além de promover a redução no consumo do ar condicionado.

4.3.2. Análise do consumo total

Nesse item serão apresentadas as somas dos consumos de energia totais nos módulos com ventilação híbrida (ventilação natural + ar condicionado) e iluminação artificial eficiente (dimerizável) para todos os climas. Os resultados são apresentados nas tabelas 25, 26 e 27.

Tabela 25: Consumo total anual para São Carlos (VH / PAF=50%)

		Consumo em kWh/m²/ano em São Carlos (PAF=50%)			
		Equipamentos	Iluminação artificial	Ar condicionado	Total
VH	MÓDULO 1 (N+S)	38.1	12.5	28.9	79.5
	MÓDULO 2 (NE+SO)	38.1	5	31.6	74.7
	MÓDULO 3 (L+O)	38.1	9.9	34.8	82.8

A tabela 25 mostra a soma dos consumos de energia totais para os módulos com ventilação híbrida em São Carlos (PAF=50%), em que se pode notar que o módulo mais

econômico é o módulo 2, com 74.7 kWh/m²/ano, apresentando a mesma tendência de resultado se comparado aos módulos apenas com ar condicionado.

A mesma análise é realizada para Natal, conforme apresentado na tabela 26.

Tabela 26: Consumo total anual para Natal (VH / PAF=30%)

		Consumo em kWh/m²/ano em Natal (PAF=50%)			
		Equipamentos	Iluminação artificial	Ar condicionado	Total
VH	MÓDULO 1 (N+S)	38.1	9.2	93.1	140.4
	MÓDULO 2 (SE+NO)	38.1	8.2	97.2	143.5
	MÓDULO 3 (L+O)	38.1	9.6	102.6	150.3

A tabela 26 apresenta a soma dos consumos de energia totais para os módulos com ventilação híbrida para Natal (PAF=50%), que também seguiu a mesma tendência dos resultados apresentados anteriormente (com AC), de modo que o módulo 1 é o mais econômico dos três, com um consumo de energia total de 140.4kWh/m²/ano. Como é possível notar, o menor consumo de iluminação artificial é o módulo 2, mas como o módulo 1 é o que possui menor consumo de ar condicionado, este apresenta-se como o mais econômico dos módulos com ventilação híbrida.

Tabela 27: Consumo total anual para São Carlos (VH / PAF=30%)

		Consumo em kWh/m²/ano em São Carlos (PAF=30%)			
		Equipamentos	Iluminação artificial	Ar condicionado	Total
VH	MÓDULO 1 (N+S)	38.1	19.5	29.6	87.2
	MÓDULO 2 (SE+NO)	38.1	12.8	31.2	82.1
	MÓDULO 3 (L+O)	38.1	16.7	33.4	88.2

A tabela 27 apresenta os consumos de energia totais par os módulos com ventilação híbrida para São Carlos (PAF=30%), os quais seguiram a mesma tendência apresentada na tabela 25 (PAF=50%), em que o módulo 2 é o mais econômico, com consumo de energia total de 82.1kWh/m²/ano.

4.4. Potencial de economia de energia

Neste item serão apresentados a comparação dos consumos de energia totais para os módulos com ar condicionado (AC) e dos módulos com ventilação híbrida (VH) para todos os climas. Os resultados são apresentados nas tabelas 28, 29 e 30.

Tabela 28: Comparação do consumo total anual para São Carlos (AC / VH / PAF=50%)

	Comparação consumo anual total para São Carlos (kWh/m² / PAF=50%)						Redução (%)
	AC / VH		AC	VH	AC	VH	
	Equip.	Ilum. artificial	Ar cond.	Ar cond.	Total	Total	
MÓDULO 1 (N+S)	38.1	12.5	40.5	28.9	91.1	79.5	12.7
MÓDULO 2 (NE+SO)	38.1	5	42	31.6	85.1	74.7	12.2
MÓDULO 3 (L+O)	38.1	9.9	44.3	34.8	92.3	82.8	10.3

A tabela 28 apresenta a comparação dos consumos de energia totais para os módulos com AC e com VH e a porcentagem de redução entre eles, para São Carlos (PAF=50%). Assim, pode-se notar que o módulo que possui maior redução no consumo total de energia é o módulo 1, com 12.7%.

Tabela 29: Comparação do consumo total anual para Natal (AC / VH / PAF=50%)

	Comparação consumo anual total para Natal (kWh/m² / PAF=50%)						Redução (%)
	AC / VH		AC	VH	AC	VH	
	Equip.	Ilum. artificial	Ar cond.	Ar cond.	Total	Total	
MÓDULO 1 (N+S)	38.1	9.2	111.5	93.1	158.8	140.4	11.6
MÓDULO 2 (SE+NO)	38.1	8.2	115.5	97.2	161.8	143.5	11.3
MÓDULO 3 (L+O)	38.1	9.6	120.9	102.6	168.6	150.3	10.9

A tabela 29 apresenta a comparação dos consumos de energia totais para os módulos com AC e com VH e a porcentagem de redução entre eles, para Natal (PAF=50%). Através dos resultados apresentados, tem-se que o módulo com maior redução no consumo de energia total é o módulo 1, reafirmando a tendência apresentada nos resultados anteriores. Entretanto, como fora supracitado, para o clima de Natal, neste caso, a ventilação híbrida não é adequada, por conta da baixa frequência de abertura da janela.

Tabela 30: Comparação do consumo total anual para São Carlos (AC / VH / PAF=30%)

	Comparação consumo anual total para São Carlos (kWh/m² / PAF=30%)						Redução (%)
	AC / VH		AC	VH	AC	VH	
	Equip.	Ilum. artificial	Ar cond.	Ar cond.	Total	Total	
MÓDULO 1 (N+S)	38.1	19.5	35.1	29.6	92.7	87.2	5.9
MÓDULO 2 (NE+SO)	38.1	12.8	36	31.2	86.9	82.1	5.5
MÓDULO 3 (L+O)	38.1	16.7	37.9	33.4	92.7	88.2	4.9

A tabela 30 apresenta a comparação dos consumos de energia totais para os módulos com AC e com VH e a percentagem de redução entre eles, para São Carlos (PAF=30%). Neste caso, pode-se perceber que a percentagem de redução no consumo total de energia é ainda menor, apresentando no máximo 5.9% para o módulo 1. Os valores de consumo de energia são maiores, principalmente em relação à iluminação artificial, pois reduzindo-se o tamanho da janela, diminui-se também a quantidade de luz natural neste ambiente, e isso faz com o que aumente o consumo de energia com ar condicionado por conta do aumento da temperatura interna (ganho de calor pelas lâmpadas).

É importante salientar que nesta pesquisa está sendo avaliado o potencial de economia de energia com base num sistema de iluminação eficiente (sistema dimerizável) que, conforme fora supracitado, gera economias de até 80% no consumo da iluminação artificial. Comparando-se os resultados desta presente pesquisa com os apresentados na revisão bibliográfica (Ezzeldin et al, 2009; RUPPP, 2011), os quais apresentam de 40% a 60% de redução, é preciso ressaltar que em tais estudos, os consumos com ventilação híbrida são sempre comparados a um caso-base em que se tem ar condicionado operando durante todo o período de ocupação e iluminação artificial ligada direto. Logo, compara-se a ventilação híbrida com o pior caso, que se teria maior consumo de energia, fazendo com que a redução seja maior.

Dessa forma, partindo-se de um caso em que se tem um sistema de iluminação eficiente, o impacto da ventilação híbrida acaba se tornando muito menor, ou seja, a iluminação artificial se apresenta como o elemento que mais impacta no consumo de energia final para os casos apresentados nesta pesquisa. Ao mesmo tempo, comparando-se os resultados entre os módulos com PAF=50% e PAF=30%, tem-se que há um aumento no consumo com iluminação artificial, devido à diminuição no tamanho da janela (isto é, menos disponibilidade de luz natural no ambiente), enquanto que o nível de desconforto é menor.

5. CONCLUSÕES

Como principais conclusões da pesquisa têm-se que, em relação à utilização da ventilação natural, foi possível comprovar, por meio do estudo experimental, que as pessoas, ao possuírem o controle absoluto sobre o aparelho condicionador de ar tenderão a ligá-lo, ao invés de aproveitar a ventilação natural obtida através das janelas. Tal constatação se reafirmou ao fazer uma análise comparativa das temperaturas de acionamento dos aparelhos condicionadores de ar em relação à temperaturas de conforto propostas pelas ASHRAE 55/2004, de onde se pode concluir que à mínima variação de temperatura, as pessoas tendem a agir de maneira a reestabelecerem o seu conforto. E quando há a possibilidade de utilização dos aparelhos condicionadores de ar, os usuários o fazem de maneira quase que imediata, para que possam manter a temperatura constante e reestabelecer o seu conforto.

Nas simulações computacionais realizadas para a iluminação natural, verificou-se que, quando se trabalha com um sistema eficiente, dimerizável, utilizando a iluminação artificial apenas como um complemento à iluminação natural, é possível promover uma redução no consumo de energia total do edifício.

Nas análises feitas para os módulos com apenas ar condicionado (operando durante todo horário de ocupação) verificou-se que tanto para São Carlos quanto para Natal esse recurso é utilizado durante todos os períodos do ano, mesmo nos meses de inverno. Em São Carlos há uma redução nesses meses, mas não há incidências, neste caso, de que seja necessário utilizar o ar condicionado para a função de aquecimento, mas apenas para resfriamento. Em Natal, o consumo com ar condicionado é sempre alto o ano todo, tendo pouca variação ao longo dos meses.

Nas simulações feitas nos módulos com apenas ventilação natural pode-se verificar que as taxas de desconforto por calor são sempre mais altas do que as de frio, no caso de São Carlos. Também é importante salientar que a faixa de conforto para São Carlos encontra-se entre 20 e 27°C, e como utilizou-se uma temperatura para ventilação natural de 20°C, isto justifica o aparecimento de graus-hora de desconforto por frio. Mesmo assim, esse “desconforto por frio” ainda assume valores bem menores do que o desconforto por calor. A mesma análise feita para Natal comprovou a necessidade de se utilizar condicionadores de ar nesse clima, já que não há desconforto por frio, mas apenas por calor e os índices são muito altos, se comparados aos de São Carlos.

Ao se utilizar o mesmo padrão de temperatura de controle (ventilação e ar condicionado) para duas cidades localizadas em zonas bioclimáticas distintas, não se obtiveram os mesmos ganhos em relação à redução no consumo dos aparelhos condicionadores de ar. Como a cidade de Natal (RN) possui um clima com temperaturas

muito mais quentes que São Carlos (SP), as janelas não abriram, já que as temperaturas internas eram sempre mais altas que o *setpoint* de 25°C (ar condicionado), fazendo com que o ar condicionado ficasse ligado o tempo todo. A partir disso, novas simulações foram realizadas, alterando-se os *setpoints* de ventilação natural e ar condicionado de acordo com a faixa de conforto para Natal, utilizando-se as temperaturas de 22°C para ventilação natural e 27°C para o ar condicionado e, mesmo assim, as janelas abriram poucas vezes. Apesar disso, houve uma redução no consumo com ar condicionado na faixa de 15%, que pode ser explicada pelo fato de em Natal a velocidade dos ventos é maior do que em São Carlos, então mesmo abrindo poucas vezes a janela, já é suficiente para resfriar um pouco o ambiente interno.

Dessa forma, concluiu-se que, para Natal, neste caso, a estratégia de ventilação híbrida utilizada neste trabalho não é adequada, mostrando que para cada clima a ser estudado, é necessário uma avaliação prévia das temperaturas de conforto e a partir disso realizar as simulações tendo como base tais critérios.

Nos estudos relacionados ao consumo do ar condicionado quando utilizado de maneira conjunta com a ventilação natural (estratégia de ventilação híbrida), pode-se perceber que há, de fato, uma redução no consumo do ar condicionado que, em São Carlos, apresentou-se por volta dos 30%.

Uma comparação feita a partir dos graus-hora de desconforto para São Carlos, com VN e VH (relacionando-os com a porcentagem de horas ocupadas no ano) mostrou que esta última reduziu consideravelmente os índices de desconforto, chegando a atingir 75% para os módulos com PAF=50% e 84% nos módulos com PAF=30%. Tal resultado comprova que a utilização da ventilação híbrida pode permitir não apenas a redução no consumo do ar condicionado, como também pode diminuir consideravelmente o desconforto, se comparado aos módulos com apenas ventilação natural, em que os graus-hora de desconforto são muito mais altos.

No entanto, quando comparou-se os consumos totais de cada módulo para AC e VH, pode-se verificar que no total, o potencial de economia de energia se apresentou na faixa dos 10 a 12%, tanto para São Carlos quanto para Natal com PAF=50%. Nos casos de São Carlos com PAF=30% essa redução se apresentou ainda menor, na faixa dos 5%, fazendo com que se conclua que o impacto da ventilação híbrida, dependendo do caso, pode não ser expressivo.

Uma questão a ser salientada é que, nos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica, as comparações dos modelos com VH são feitas sempre em relação a um modelo com alto gasto de energia (ar condicionado e iluminação artificial operando durante todo o período de ocupação), o que gera altas reduções no consumo de energia total.

No caso da presente pesquisa, partiu-se de um sistema de iluminação eficiente (dimerizável) para então se inserir a ventilação híbrida, fazendo com que as reduções no

consumo de energia total fossem menores, o que demonstra que a iluminação artificial possui um impacto muito maior neste caso.

Todavia, apesar do potencial de economia de energia se apresentar na faixa dos 12%, é preciso apontar que os graus-hora de desconforto para São Carlos (PAF=50% e PAF=30%) são reduzidos de maneira significativa (cerca de 80%), fazendo com que tal sistema tenha uma importância na melhoria do conforto térmico nos ambientes de escritório.

Dessa forma, como contribuição ao estudo da eficiência energética, a presente pesquisa demonstrou a importância da utilização dos recursos naturais existentes, tais como a ventilação e a iluminação natural, como elementos que contribuem para a redução do consumo de energia elétrica.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se que se trabalhe com mais variações de parâmetros, tais como inserção de ventilação cruzada, outras orientações, diferentes materiais e novas dimensões dos modelos, afetando assim tanto a iluminação quanto a ventilação natural. Realizar simulações computacionais em outras regiões bioclimáticas também seria interessante. Uma questão que não foi trabalhada nesta pesquisa é a inserção dos coeficientes de pressão, os quais foram calculados automaticamente pelo *EnergyPlus*. A inserção dos coeficientes de pressão aliados à geometria do modelo poderá gerar melhores resultados em relação à ventilação natural, haja vista que o programa *EnergyPlus* calcula coeficientes de pressão médios, os quais podem vir a gerar imprecisões na simulação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGERHOLM, S. Control of hybrid ventilation systems. **International Journal of Ventilation**, v.1, nº4, February, 2003.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M.. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. Volume 5, São Paulo: Blucher, 2011.
- ARNOLD, D. Mixed Mode HVAC. An Alternative Philosophy. **ASHRAE Transactions**, v. 102, n.1, 1996.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. **Fundamentals handbook**. Atlanta, USA, 2001.
- _____. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1. Atlanta, 2007.
- _____. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. ANSI/ASHRAE Standard 55 – 2004. American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NRB 5461**: Iluminação: Terminologia. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NRB 5413**: Iluminância de Interiores. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 15215**: Iluminação Natural. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR15215-4**: Iluminação natural – Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição. Rio de Janeiro, 2004.
- ALBUQUERQUE, M. S. C. de; AMORIM, C. N. D. Iluminação natural: indicações de profundidade-limite de ambientes para iluminação natural no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais – RTQ-R. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 37-57, abr./jun. 2012.
- AMORIM, C. N. D.; CINTRA, M. S.; SUDBRACK, L. O.; CAMOLESI, G. E.; SILVA, C. **Simulação de iluminação natural em cidades brasileiras: a influência da profundidade dos ambientes residenciais**. XI Encontro Nacional de Conforto Ambiental no Ambiente Construído – ENCAC. Búzios, RJ, Brasil, 2011.
- AMORIM, C. N. D. **Iluminação Natural e Eficiência Energética** – Parte I: Estratégias de Projeto para uma Arquitetura Sustentável. (s/d). Disponível em: <<http://vsites.unb.br/fau/qualilumi/arquivos/parte1.pdf>>. Acesso em 3 out. 2011.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). **Relatório final 2012**: Ano base 2011. Rio de Janeiro : EPE, 2012.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à Ventilação Natural**. Maceió: EDUFAL, 2005.
- BRAGER, G. S.; RING, E.; POWELL, K. Mixed-mode ventilation: Hvac meets Mother Nature. **Engineered Systems**, May 2000.
- BRAGER, G. Mixed-mode cooling. **ASHRAE Journal**, v. 48, p. 30–37, 2006.

BRUGNERA, R.R.; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. **Temperaturas de acionamento de condicionadores de ar e ventiladores**. XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC). Brasília, DF, 25 a 27 de setembro de 2013.

CARLO, J. C. **Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações**. Relatório Técnico LabEEE-200504: Disponível em <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/RT200504.pdf> . Acesso em 10 ago. 2013.

_____. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação de eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC, 2008.

CARRIÈRES, K.R. M. **Desempenho Térmico e Consumo Energético de Edifícios de Escritórios em São Carlos, SP**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Campinas, SP, 2007.

CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT (CBE). University of California, Berkeley. **About mixed mode**. Disponível em: <<http://www.cbe.berkeley.edu/mixedmode/aboutmm.html>>. Acesso em 20 jun. 2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Padrões de Qualidade do ar**. Disponível em: <http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_indice_padroes.asp>. Acesso em 10 fev. 2014.

DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY (EERE). **ENERGYPLUS**. Version 8.0. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2012.

_____. **Open Studio**. Version 1.0.7.390. US: Department of Energy Efficiency and RenewableEnergy, Office of Building Technologies, 2012.

DRAKE, S.; DE DEAR, R.; ALESSI, A.; DEUBLE, M. Occupant comfort in naturally ventilated and mixed-mode spaces within air-conditioned offices. **Architectural Science Review**, nº53, 2010.

DEUBLE, M. P.; DE DEAR, R. J. Mixed-mode buildings: A double standard in occupants' comfort expectations. **Building and Environment**, v. 54, p. 53 – 60, 2012.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Campinas, SP, 2008.

ETHERIDGE, D. W.; FORD, B. Natural ventilation of tall buildings: options and limitations. **Proceedings**. CTBUH 8th World Congress. Tall and Green: Typology for a Sustainable Urban Future. The Council on Tall Buildings and Urban Habitat: Dubai, 3 – 5 mar. 2008.

EZZELDIN, S.; REES, S.; COOK, M. **Performance of mixed-mode cooling strategies for office buildings in arid climates**. Eleventh International IBPSA Conference, Building Simulation, Glasgow, Scotland, Jul 27-30, 2009.

FIGUEIREDO, C. M. de. Ventilação natural em edifícios. **Revista Arcoweb**. 06 dez. 2007.

FIGUEIREDO, C. M. de; FROTA, A. B. **Ventilação Natural para Conforto Térmico em Edifícios de Escritórios** – Avaliação com Modelos Adaptativos. In: 7ª Seminário Internacional do Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, NUTAU

(CD), São Paulo, 2008. Disponível em: < <http://www.usp.br/nutau/CD/149.pdf>>. Acesso em 28 set. 2012.

FIGUEIRÓ, M. **A Luz e a Sua Relação Com a Saúde**. Lume, São Paulo, v. 8, n. 44, jun. 2010.

GHIAUS, C. Free-running building temperature and HVAC climatic suitability. **Energy and Buildings**, v.35, p. 405-411, 2003.

GHISI, E.; TINKER, J. A.; IBRAHIM, S. H. Área de janela e dimensões de ambientes para iluminação natural e eficiência energética: literatura versus simulação computacional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n.4, p. 81-93, out./dez. 2005.

GHISI, E. **The use of fibre optics on energy efficient lighting in buildings**. 2002. 312 f. Tese (PhD em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Leeds, Leeds, 2002.

GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. 2ª edição: Londres: Applied Science, 1976.

GOOGLE. **Google SketchUp**. Version 7.0. [S.l.]: Google, 2008.

_____. **Google SketchUp**. Version 8.0. [S.l.]: Google, 2010.

GRATIA, E.; HERDE, A.de. Design of low energy office buildings. **Energy and Buildings**, v. 35, Issue 5, p. 473-491, June 2003.

GRATIA, E.; BRUY'ERE, I.; HERDE, A. De. How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. **Building and Environment**, v. 39, p. 1157 – 1170, 2004.

HERTZ, J.B. **Ecotécnicas em arquitetura: como projetar nos trópicos úmidos do Brasil**. São Paulo: Pioneira, 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). RTQ-R - **Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética em edificações residenciais**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Requisitos de avaliação da conformidade para Condicionadores de ar. Portaria n.º 007**, de 04 de janeiro de 2011. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001941.pdf>>. Acesso em 14 jan. 2014.

KÖHLER, W. **Iluminação arquitetônica, luz e cor como elementos para design de interiores**. Berlin: Bauwelt Verlag, 1956.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **Apostila do curso básico do programa EnergyPlus**. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, SC, 2009.

_____. **Analysis Bio**. Versão 2.1.5. Florianópolis: LabEEE, 2009. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/software/analysis-bio>>. Acesso em 20 set. 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: Ed. PW Brasil, 1997.

LAMBERTS, R.; MELO, A. P.; MATOS, M. M.; VERSAGE, R.; SORGATO, M. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LABEEE. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, SC, 2008.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A.; GOULART, S.; DE VECCHI, R. **Conforto e Stress Térmico**. ECV 4200 I ARQ1303 Conforto Térmico. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico - Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, SC, 2012.

LECHNER, N. **Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects**. Hoboken, New Jersey: John Wiley e Sons, 2008.

LIGGETT, R.; MILNE, M. **Climate Consultant version 5.4**. UCLA Design Tool Group, USA. 2012.

LOMAS, K.J.; COOK, M.J.; FIALA, D. Low energy architecture for a severe US climate: design and evaluation of a hybrid ventilation strategy. **Energy and Buildings**, v. 39(1), 32-44, 2007.

MAJOROS, A. **Daylighting**. PLEA Notes, Note 4. PLEA in Association with Department of Architecture, the University of Queensland. Edited by S.V.Szokolay, 1998.

MARCONDES, M. P.; ALUCCI, M. P.; GONÇALVES, J. C. S. **Fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo**. XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC, Búzios, RJ, 2011.

MARQUES, T. H. T. **Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações sociais em São Carlos, SP**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2013.

MARTAU, B. T. A Luz Além da Visão. **Lume**, v. 7, n. 38, jun. 2009.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. da C. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, RS, Brasil, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA (NRCC). Harvard University. **DAYSIM**, Version 3.1. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Alemanha, 2010.

NICOL, J.F.; HUMPHREYS, M.A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, v.34, Issue 6, p. 563-572, July 2002.

PEREIRA, F. O. R.; LOPES, A. C.; MARQUES, A.; TEODORO, E.; BATISTA, J. O.; SANTANA, M. V.; FONSECA, R. W.; ATANÁSIO, V. **Uma investigação sobre a consideração da iluminação natural nas diferentes etapas de projeto**. ENCAC – ELACAC, Maceió, Alagoas, Brasil, 2005.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. de. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 31-51, jan./mar. 2010.

RAMOS, G. **Análise da iluminação natural calculada por meio do programa EnergyPlus**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, SC, 2008.

RAMOS, G.; GHISI, E. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 157-169, abr./jun. 2010.

RAMOS, G.; LAMBERTS, R. **Relatório técnico do método de avaliação do sistema de iluminação do RTQ-C (s/d)**. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/node/401>>. Acesso em 10 ago. 2013.

REINHART, C. F. A Simulation-Based Review of the Ubiquitous Window-Head-Height to Daylit Zone Depth Rule-of-Thumb. In: INTERNACIONAL BUILDING SIMULATIONS CONFERENCE, 9. Montreal, 2005. **Proceedings...** Montreal: IBPSA, 2005.

_____. **Tutorial on the use of Daysim Simulations for Sustainable Design.** Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 2006.

_____. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design.** Harvard University, Graduate School of Design, Cambridge, MA 02138, USA, 2010.

REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylit spaces. **Building and Environment**, v.46, n.2. p. 386-396, 2011.

RIJAL, H.B.; TUOHY, P.; HUMPHREYS, M.A.; NICOL, J.F.; SAMUEL, A.; CLARKE, J. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. **Energy and Buildings**, v. 39, p. 823–836, 2007.

ROCHA, A. P. de A.; PEREIRA, F. O. R. **Avaliação do consumo de energia de edificações considerando a luz natural e sistemas de controle através de simulação computacional integrada.** XI Encontro Nacional de Conforto Ambiental no Ambiente Construído – ENCAC. Búzios, RJ, Brasil, 2011.

ROETZEL, A.; TSANGRASSOULIS, A.; DIETRICH, U.; BUSCHING, S. A review of occupant control on natural ventilation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, p. 1001–1013, 2010.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano.** São Paulo : Projeto, 1988.

RORIZ, M. **Consumo de energia no condicionamento térmico de edificações:** um método de avaliação. VI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC, São Pedro, SP, 2001.

_____. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros.** ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Relatório Interno, 2012 (a). Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso em: 9 out. 2012.

RUAS, A. C.; LABAKI, L.C. **Ventilação do ambiente e o conforto térmico.** VI Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído - ENCAC. São Pedro, SP, Brasil, 2001.

RUPP, R. F. **Dimensionamento de Área de Janela em Edificações Comerciais:** Integração da Iluminação Natural com a Artificial e Utilização da Ventilação Híbrida. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, SC, 2011.

Sistema de Coleta de Dados Ambientais (SINDA). **Estações ambientais automáticas.** Disponível em: <<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>>. Acesso em 17 mar. 2013.

THE CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS (CIBSE). **Code for interior lighting.** UK, 1994.

TOLEDO, A. M. **Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos:** uma aplicação em Maceió/AL. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, 2006.

TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 37-58, out./dez. 2010.

VIANNA, N.S. e GONÇALVES, J.C.S. **Iluminação e Arquitetura**. São Paulo: Geros S/C Ltda., 2001.

YANNAS, S.; CORBELLA, O. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental**. Rio de Janeiro: Revan, 2003.

YAO, R.; LI, B.; STEEMERS, K.; SHORT, A. Assessing the natural ventilation cooling potential of office buildings in different climate zones in China. **Renewable Energy**, v. 34, n. 12, p. 2697-2705, 2009.

YUN G. Y.; TUOHY, P.; STEEMERS, K. Thermal performance of a naturally ventilated building using a combined algorithm of probabilistic occupant behaviour and deterministic heat and mass balance models. **Energy and Buildings**, v. 41, Issue 5, pages 489–499, 2009.

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