

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

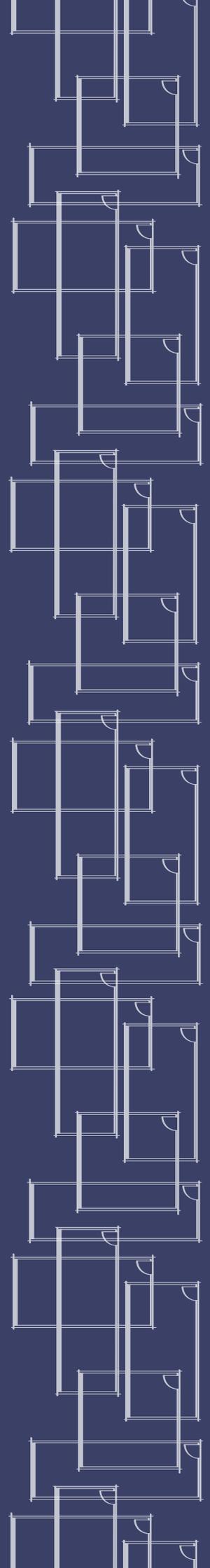
INSTITUTO DE ARQUITETURA
E URBANISMO

CAROLINE ANTONELLI SANTESSO

Integração da ventilação
híbrida e da iluminação
natural em saletas
comerciais na cidade de
São Paulo: influência de
parâmetros de projeto

São Carlos

2017



CAROLINE ANTONELLI SANTESSO

Integração da ventilação híbrida e da iluminação natural em saletas
comerciais na cidade de São Paulo: influência de parâmetros de
projeto

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 Ciências.

Área de concentração:
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

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

Apoio:
Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de
Nível Superior – CAPES

Versão Corrigida

São Carlos
2017

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo

com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S234i Santesso, Caroline Antonelli
Integração da ventilação híbrida e da iluminação natural em saletas comerciais na cidade de São Paulo: influência de parâmetros de projeto / Caroline Antonelli Santesso; orientadora Karin Maria Soares Chvatal. -- São Carlos, 2017.
172 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2017.

1. Eficiência energética. 2. Ventilação híbrida. 3. Iluminação natural. 4. Percentual de área de abertura na fachada (PAF). 5. Simulação computacional. I. Chvatal, Karin Maria Soares, orient. II. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheira Ambiental **Caroline Antonelli Santesso**

Título da dissertação: **"Integração da ventilação híbrida e da iluminação natural em saletas comerciais na cidade de São Paulo: influência de parâmetros de projeto"**

Data da defesa: **11/11/2016**

Orientador: Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal

Karin Maria Soares Chvatal

IAU/USP (Não votante)

Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles
(IAU/USP)

Aprovada

Profa. Dra. Leticia Oliveira Neves
(FEC/UNICAMP)

aprovada

Profa. Dra. Marieli Azoia Lukiantchuki
(UNICESUMAR)

APROVADA

Coordenadora e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Profa. Dra. **Cibele Saliba Rizek.**

*A todos aqueles que almejam, acreditam e,
principalmente, trabalham na construção de
um país mais sustentável.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais, Elizete e Fernando, por apoiarem minha decisão na escolha do caminho acadêmico, proporcionando todas as condições possíveis para que eu pudesse finalizar mais essa etapa. Também à minha querida irmã Larissa, por se preocupar e estar sempre ao meu lado.

A minha doce avó, Tereza, por sempre se orgulhar e olhar por sua neta, assim como a todos os familiares, do lado materno e paterno, que estiveram presente durante meu progresso.

Ao meu companheiro Vinícius, que além da parceria e carinho, sempre me entendeu nos momentos de nervosismo. Agradeço também por me proporcionar uma segunda família, e, especialmente, por sempre me fazer sorrir.

A todos os meus queridos amigos de Ibitinga e da faculdade, por, acima de tudo, a união, prevalecendo à amizade mesmo com o passar dos anos.

A minha grande amiga e antiga orientadora, Clauciana, que mesmo depois da graduação continua presente em minha vida, buscando o melhor para o meu desenvolvimento e apoiando minhas decisões.

A todos os novos amigos que fiz ao longo desse mestrado no IAU, por toda a força, aprendizagem e por participarem dessa importante trajetória.

A professora Karin Chvatal, por todo incentivo e dedicação, se destacando como orientadora, auxiliando não só no meu desenvolvimento profissional, mas também pessoal.

À Kelen Dornelles, Letícia Neves, Tássia Marques e Vitor Roriz, por toda disponibilidade, estímulo e ajuda no decorrer do desenvolvimento dessa dissertação.

Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio e fomento a este trabalho de pesquisa.

Por fim, a todos que de uma forma ou de outra sempre estiveram presentes em minha vida, acreditando em meus ideais.

*"You must learn a new way to think before you
can master a new way to be"*

Marianne Williamson

RESUMO

SANTESSO, C. A. **Integração da ventilação híbrida e da iluminação natural em saletas comerciais na cidade de São Paulo**: influência de parâmetros de projeto. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Atualmente, os edifícios de escritórios selados hermeticamente e com as chamadas “peles de vidro” estão presentes em diversos países, e possuem, como consequência, um elevado consumo de energia elétrica para conseguir manter o conforto ambiental dos usuários. Contudo, é possível se beneficiar de uma maior eficiência energética nesses espaços através da combinação de soluções ativas e passivas. Esse estudo tem como objetivo principal avaliar a influência de parâmetros de projeto, tais como o formato da sala, tamanho e orientação das aberturas na fachada, no consumo de energia e no conforto visual em saletas comerciais com ventilação híbrida e integração da iluminação natural com a artificial na cidade de São Paulo. As saletas comerciais analisadas possuem uma área média, diferentes formatos e diferentes aberturas em uma só fachada, representando a solução arquitetônica mais comum encontrada nesse tipo de edifício. Através da análise energética realizada por meio do programa *EnergyPlus* e da análise lumínica com o programa *DIVA-for-Rhino*, verificou-se que o formato da sala é essencial para a decisão de um percentual de área de abertura na fachada (PAF) que consuma menos energia. Os resultados mostraram que o uso da ventilação híbrida sempre representou uma economia, atingindo uma redução de até 51% do consumo do ar condicionado para resfriamento e até 26% do consumo de energia total, com os PAF's de 40, 70 e 100%. Seria interessante considerar elementos de proteção solar que não diminuam a eficácia da ventilação e iluminação naturais nesses ambientes, para se aliar o baixo consumo de energia com menores riscos de ofuscamento. Desta forma, o trabalho auxilia a incorporação destas estratégias para uma maior economia de energia no desenvolvimento do projeto arquitetônico desta tipologia de edifício comercial.

Palavras-chave: Eficiência energética. Ventilação híbrida. Iluminação natural. Percentual de área de abertura na fachada (PAF). Simulação computacional.

ABSTRACT

SANTESSO, C. A. **Daylighting and hybrid ventilation integration in cellular offices in the city of São Paulo**: design parameters influence. 2017. 86 s. Thesis (Master). Institute of Architecture and Urbanism of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2017.

Nowadays, sealed airtight office buildings and so-called "glass curtain wall" are present in many countries, and have as a result a high consumption of electric energy to be able to maintain the environmental comfort of the users. However, the combination of passive and active strategies could improve the energy efficiency in these spaces. This study aims to evaluate the design parameters influence, such as room's shape, the opening's size and orientation, in the energy consumption and in the visual comfort in cellular offices with hybrid ventilation system and the integration of daylight and artificial lighting in São Paulo. The analyzed cellular offices have an average area, different shapes and different openings in one facade, representing the more common architectural characteristics found in this type of building in that context. Energy analyses in EnergyPlus and daylight studies using DIVA-for-Rhino were conducted. It was found that the room's shape is essential for the determination of the window-to-wall-ratio (WWR) for reducing energy consumption. The results showed that the hybrid ventilation use always represented an economy, reaching reduction values up to 51% in the consumption of air conditioning for cooling and up to 26% in cellular office's total consumption, with a WWR of 40, 70 and 100%. It would be interesting to consider sun shading elements that do not reduce the effectiveness of natural ventilation and daylighting in these environments to combine low power consumption with a lower risk of glare. In this way, the work helps the incorporation of these strategies for save energy in the development of the architectural design of this type of commercial building.

Keywords: Energy Efficiency. Hybrid ventilation. Daylighting. Window-to-wall-ratio (WWR). Computer simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Edificações com saletas comerciais.....	32
Figura 2 - Curva do nível de iluminância em diferentes distâncias da janela	44
Figura 3 - Diferentes geometrias estudadas e áreas envidraçadas da fachada	46
Figura 4 - Sistema simultâneo	49
Figura 5 - Sistema por zoneamento.....	50
Figura 6 - Sistema alternado.....	50
Figura 7 – Corte vertical de edifício de modo misto na China.....	53
Figura 8 - Edifício de modo misto no Canadá.....	53
Figura 9 - Fatores que podem influenciar na escolha da área envidraçada.....	55
Figura 10 – Exemplo de modelo estudado e variações de PAF.....	57
Figura 11 - Consumo anual de eletricidade como função da PAF para o caso 2, sala pequena (P), geometria 2:1 e orientação sul	57
Figura 12 - Fluxos de calor de um dia médio anual de acordo com cada PAF e caso (1 e 2)	59
Figura 13 - Programas utilizados para a simulação computacional.....	63
Figura 14 - Diagrama do processo metodológico.....	65
Figura 15 - Características de um edifício com saletas comerciais “médias” na cidade de São Paulo	66
Figura 16 - Geometria dos modelos de saletas comerciais	67
Figura 17 - Rosa dos ventos para a cidade de São Paulo	69
Figura 18 – Exemplo da modelagem de geometria da sala comercial	70
Figura 19 - Modelos adotados por (a) Reinhart e Wienold (2011); (b) Ghisi (2002); (c) Rupp (2011) e; (d) Brugnera (2014)	72
Figura 20 - Geometria exemplo de um módulo de simulação	73
Figura 21 - Combinações dos modelos com as variações do trabalho	77
Figura 22 - Exemplo da organização de uma planilha automática.....	82
Figura 23 - Uso da iluminação durante os meses do ano para uma variação do Modelo 1:1	87
Figura 24 - Uso da iluminação durante as horas ocupadas no ano para uma variação do Modelo 1:1	87
Figura 25 - Uso da iluminação durante os meses do ano do Modelo 1:1, PAF 10%, orientação norte.....	88

Figura 26 - Uso da iluminação durante as horas ocupadas no ano do Modelo 1:1, PAF 10%, orientação norte.....	89
Figura 27 - Porcentagem do período ocupado com uma iluminância > 2000 lx ao longo do ano em cada ponto do Modelo 1:1, todos os PAF, orientação norte	90
Figura 28 - Uso da iluminação durante o ano do Modelo 1:1, PAF's 10 e 100%, todas as orientações.....	91
Figura 29 - Percentual de iluminância insuficiente (<100 lx), útil (100-200lx) e excessiva (>2000 lx) para o Modelo 1:1	91
Figura 30 - Uso da iluminação durante o ano dos Modelos 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1, todos os PAF's, orientação norte	93
Figura 31 - Percentual de iluminância insuficiente (<100 lx), útil (100-200lx) e excessiva (>2000 lx) para todos os Modelos, todos os PAF's e todas orientações	94
Figura 32 - Redução do uso do ar condicionado no modo misto comparado com o ar condicionado constante para uma variação do Modelo 1:1	95
Figura 33 - Uso da ventilação natural e do ar condicionado para uma variação do Modelo 1:1 em cada mês e no ano.....	96
Figura 34 - Ocorrências de horas sem ACv e VN para uma variação do Modelo 1:1 ao longo do ano	97
Figura 35 - Utilização da ventilação natural em cada hora por mês e no ano para uma variação do Modelo 1:1	98
Figura 36 - Representação de um dia médio ocupado para cada mês para uma variação do Modelo 1:1 com VH	100
Figura 37 - Representação de um dia médio ocupado para cada mês para uma variação do Modelo 1:1 com ACc	101
Figura 38 - Redução do uso do ar condicionado no modo misto comparado com o ar condicionado constante do Modelo 1:1, PAF 10%, orientação norte.....	102
Figura 39 - Representação de um dia médio ocupado para um mês de cada estação do Modelo 1:1, PAF's 10 e 100%, orientação norte.....	103
Figura 40 - Redução do uso do ar condicionado no modo misto comparado com o ar condicionado constante do Modelo 1:1, PAF's 10 e 100%, todas as orientações.....	104
Figura 41 - Representação de um dia médio ocupado para o mês de junho do Modelo 1:1, PAF's 10 e 100%, todas as orientações.....	106

Figura 42 - Redução do uso do ar condicionado no modo misto comparado com o ar condicionado constante dos Modelos 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1, todos os PAF's e orientação norte	107
Figura 43 - Uso da ventilação natural e do ar condicionado do Modelo 1:3, PAF 10%, orientação leste	108
Figura 44 - Representação de um dia médio ocupado para o mês de junho para todos os Modelos, PAF 100%, orientação norte	109
Figura 45 - Ganhos e perdas de calor para a saleta comercial com uso do ar condicionado constante (ACc) para uma variação no Modelo 1:1	110
Figura 46 - Ganhos e perdas de calor para a saleta comercial com o uso da ventilação híbrida (VH) para uma variação no Modelo 1:1	111
Figura 47 - Somatória dos ganhos e perdas de calor anuais em relação a cada parâmetro dos casos ACc e VH do Modelo 1:1, todos os PAF's, orientação norte..	112
Figura 48 - Somatória dos ganhos e perdas de calor em relação a cada parâmetro dos casos ACc e VH do Modelo 1:1, todos os PAF's e todas as orientações	114
Figura 49 - Ganhos e perdas de calor para a saleta comercial com uso ventilação híbrida (VH) do Modelo 1:1, PAF de 70%, orientação leste.....	115
Figura 50 - Ganhos e perdas de calor para a saleta comercial com uso ventilação híbrida (VH) do Modelo 1:1, PAF de 70%, orientação oeste	115
Figura 51 - Somatória dos ganhos e perdas de calor em relação a cada parâmetro do caso VH de todos os Modelos, todos os PAF's e orientação norte.....	116
Figura 52 - Redução do consumo do ar condicionado com a ventilação híbrida para uma variação do Modelo 1:1	118
Figura 53 - Consumos de energia para o AC e risco de ofuscamento do Modelo 1:1, todos os PAF's, orientação norte.....	120
Figura 54 - Comparação do consumo dos equipamentos, iluminação e ar condicionado (convertido em split) do Modelo 1:1, todos os PAF's, orientação norte	122
Figura 55 - Consumos de energia para o AC ideal e risco de ofuscamento do Modelo 1:1, todos os PAF's e todas as orientações	123
Figura 56 - Redução do consumo do ar condicionado com a ventilação híbrida do Modelo 1:1, todos os PAF's e todas as orientações	123
Figura 57 - Consumos de energia para o AC ideal e risco de ofuscamento dos Modelos 1:2, 1:3, 1:1, 2:1 e 3:1 todos os PAF's e orientação norte	125

Figura 58 - Redução do consumo do ar condicionado com a ventilação híbrida dos Modelos 1:2 e 1:3, todos os PAF's e todas as orientações.....	126
Figura 59 - Redução do consumo do ar condicionado com a ventilação híbrida dos Modelos 2:1 e 3:1, todos os PAF's e todas as orientações.....	127
Figura 60 - Consumos de energia para o AC ideal e risco de ofuscamento do Modelo 3:1, todos os PAF's, orientação norte e alteração de carga de equipamentos e TCa	131
Figura 61 - Consumos de energia para o AC ideal e risco de ofuscamento do Modelo 1:3, todos os PAF's, orientação norte e alteração de carga de equipamentos e abertura do vão.....	132
Figura 62 - Somatória dos ganhos e perdas de calor em relação a cada parâmetro do Modelo 1:3, todos os PAF's, orientação norte e variação de carga alta.....	133
Figura 63 - Somatória dos ganhos e perdas de calor em relação a cada parâmetro do Modelo 1:3, todos os PAF's, orientação norte e variação da abertura efetiva..	133
Figura 64 –Consumo de energia para o AC ideal, risco de ofuscamento e uso da iluminação artificial para todos os Modelos, orientação norte e PAF's de 10, 20, 30, 40, 70 e 100%.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos para se analisar a eficiência energética de cada sistema.....	37
Tabela 2 - Requisitos obrigatórios do RTQ-C para envoltórias com janelas laterais	38
Tabela 3 – Ambientes, tarefas e atividades com a especificação da iluminância....	40
Tabela 4 - Indicações da literatura internacional sobre a relação da profundidade do ambiente e a altura do topo da janela.....	43
Tabela 5 - Recomendações mínimas para o uso da iluminação natural no projeto arquitetônico de salas de escritório.....	44
Tabela 6 - Variáveis a serem observadas para um projeto com ventilação natural..	48
Tabela 7 - Percentual de área de abertura na fachada.....	58
Tabela 8 – Módulos para simulação da ventilação híbrida e da iluminação natural	60
Tabela 9 - Características dos modelos de saletas comerciais escolhidas para a simulação.....	67
Tabela 10 - Características das médias mensais ao longo do ano para São Paulo...	68
Tabela 11 - Dados de entrada do <i>plug-in DIVA-for-Rhino</i>	71
Tabela 12 - Estrutura com os grupos básicos de um arquivo geral.....	74
Tabela 13 - Características de construção.....	75
Tabela 14 - Ganhos internos e padrão de uso.....	76
Tabela 15 - Dados de entrada do AirflowNetwork.....	78
Tabela 16 - Dados de entrada principais do ar condicionado.....	79
Tabela 17 - Formas de controle da ventilação híbrida.....	80
Tabela 18 - Siglas e nomenclaturas presentes nos resultados.....	86
Tabela 19 - Redução do consumo do ar condicionado com o modo misto para uma variação do Modelo 1:1.....	118
Tabela 20 - Redução do consumo total com o modo misto para uma variação do Modelo 1:1.....	119
Tabela 21 - Redução do consumo do ar condicionado com o modo misto do Modelo 1:1, todos os PAF's, orientação norte.....	120
Tabela 22 - Redução do consumo do ar condicionado com o modo misto do Modelo 1:1, todos os PAF's e orientações.....	124
Tabela 23 - Reduções mínimas e máximas do consumo do ar condicionado para resfriamento com o modo misto, todos os Modelos, PAF's e orientações.....	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Ar condicionado geral
ACc	Ar condicionado constante
ACv	Ar condicionado da ventilação híbrida
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
CBE	Center for the Built Environment
CFD	Programa computacional de dinâmica dos fluidos
DA	Autonomia de Luz Diurna
DF	Fator de Luz Diurna
DPI	Densidade de Potência em Iluminação
EERE	Departamento de Energia Norte-Americano
EP	EnergyPlus
EPE	Empresa de pesquisa energética
EPW	Energyplus Weather File
EQ	Equipamentos
HVAC	Heating, Ventilating, and Air Conditioning
IA	Iluminação artificial
IN	Iluminação natural
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISO	International Standardization Organization
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
MM	Modo misto
NBR	Norma Brasileira
NV	Naturalmente ventilados
PAF	Percentual de área de abertura na fachada
PAT	Parametric Analysis Tool
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PMV	Voto Médio Preditado
PPD	Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
TCa	Temperatura de controle do ar condicionado

TCv	Temperatura de controle da ventilação
Te	Temperatura externa do ar
Ti	Temperatura interna do ar
UDI	Iluminância Útil da Luz natural
VH	Ventilação híbrida (VN e ACv)
VN	Ventilação natural

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Objetivos	28
1.1.1 Objetivo geral.....	28
1.1.2 Objetivos específicos	28
1.2 Estrutura da dissertação	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 Contextualização	29
2.2 Edifícios de escritórios	30
2.2.1 Tipologias.....	30
2.2.2 Conforto térmico e o comportamento dos usuários.....	32
2.2.3 Eficiência energética e o RTQ-C	35
2.3 Iluminação natural	39
2.3.1 Características	39
2.3.2 Análise em interiores.....	41
2.3.3 Regras gerais	42
2.3.4 Potencial de economia de energia	45
2.4 Ventilação híbrida	47
2.4.1 Definições	49
2.4.2 Vantagens e desvantagens.....	51
2.4.3 Edifícios de modo misto e potencial de economia de energia	52
2.5 Integração da iluminação natural e da ventilação híbrida	54
2.6 Programas de simulação computacional	60
3 METODOLOGIA	63
3.1 Definições Preliminares	65
3.1.1 Geometrias	65
3.1.2 Clima.....	67
3.1.3 Parâmetros variáveis	69
3.2 Modelagem da iluminação natural	70
3.3 Modelagem dos arquivos gerais	72
3.3.1 Componentes construtivos.....	75
3.3.2 Ganhos internos	75
3.4 Modelagem paramétrica	76
3.5 Modelagem da ventilação natural	77
3.6 Modelagem do ar condicionado	79
3.7 Modelagem da ventilação híbrida	80
3.8 Integração das simulações	81

3.9	Variações extras.....	81
3.10	Análise dos resultados	82
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4.1	Padrão de funcionamento da iluminação natural e artificial	86
4.2	Padrão de funcionamento da ventilação híbrida e do ar condicionado constante	94
4.3	Ganhos e perdas de calor.....	109
4.4	Consumo de energia versus conforto visual.....	117
4.5	Síntese dos principais resultados encontrados em todos os Modelos	129
4.6	Influência de outros parâmetros	131
5	CONCLUSÕES	135
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	137
	REFERÊNCIAS	139
	APÊNDICES.....	147

1 INTRODUÇÃO

A questão energética no Brasil sempre demonstrou ser uma preocupação para o país, sendo que apesar do crescimento da geração de energia ser maior que o crescimento de seu consumo, é necessário importar esse recurso para atender toda a demanda devido às perdas recorrentes. Um dos principais contribuintes desse uso de energia elétrica advém das edificações, representando 42,5% do total consumido (EPE, 2015). Neste contexto, parte deste recurso é direcionado aos edifícios comerciais com grandes fachadas envidraçadas e sistemas sofisticados de ar condicionado. Essa tipologia arquitetônica mantém constantes as condições térmicas dos ambientes, desconsiderando as condições climáticas locais, gerando como consequência, um grande consumo de energia elétrica e impacto ambiental para conseguir equilibrar o alto ganho de calor interno com os ocupantes, luzes e equipamentos (BRAGER; RING; POWELL, 2000; DRAKE et al., 2010; EZZELDIN; REES, 2013; ROAF; CRICHTON; NICOL, 2009).

Nesse sentido, torna-se importante resgatar o uso de estratégias bioclimáticas, na tentativa de diminuir a utilização de energia pelos sistemas artificiais de iluminação e climatização e assim, aumentar a eficiência energética da edificação. Para isso, diversas soluções passivas têm sido pesquisadas. Dentre elas, estratégias que se utilizam da iluminação e ventilação naturais se destacam por serem de fontes gratuitas e recomendadas em diversas localidades (BATTLE, 2003; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008; MENDLER; ODELL; LAZARUS, 2006; ROAF; CRICHTON; NICOL, 2009; VIANNA; GONÇALVES, 2007).

A utilização da iluminação natural, além de proporcionar ao ambiente uma iluminação com melhor qualidade, pode diminuir os ganhos térmicos internos e economizar de 30 a 70% de energia elétrica, dependendo das condições do edifício e da localização. Nos edifícios de escritórios, é essencial observar a influência da qualidade desse recurso no desempenho dos usuários, já que neste local são desenvolvidas atividades visuais, devendo-se ter o cuidado com a elevada iluminância, que pode causar ofuscamento e altos ganhos térmicos (NABIL; MARDALJEVIC, 2005; VIANNA; GONÇALVES, 2007).

Outra solução passiva, a ventilação natural, além de contribuir com a diminuição do consumo de energia, também pode aumentar o conforto térmico dos usuários. No entanto, apesar do seu grande potencial, existe a dificuldade de

previsão e controle do conforto térmico. O uso desta estratégia nos edifícios comerciais pode não ser suficiente para remover o calor em excesso em certos períodos do ano, devido aos altos ganhos de calor no interior da edificação, além de não ser recomendada em lugares com alto índice de poluentes e ruído (BRAGER, 2006; BRAGER; RING; POWELL, 2000; LOMAS; COOK; FIALA, 2007; TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010).

Com a finalidade de promover os benefícios da ventilação natural, evitando-se o consumo de energia elevado, e ao mesmo tempo, garantindo o conforto dos usuários, existe o conceito denominado "modo misto" ou "ventilação híbrida" (BRAGER; RING; POWELL, 2000). Tal estratégia consiste em integrar a ventilação natural aos sistemas de condicionamento artificial de ar, sendo que esta integração pode ser realizada de várias formas (CBE, 2016): a) Simultânea ou concorrente: a ventilação natural e o sistema mecânico estão presentes no mesmo espaço e atuam ao mesmo tempo; b) Alternada ou de conversão: a ventilação natural e o condicionamento artificial de ar ocorrem em um mesmo espaço, porém em tempos diferentes; e c) Por Zoneamento: a ventilação natural e o sistema de climatização atuam ao mesmo tempo, contudo em espaços separados.

Recentemente, têm-se notado um crescente interesse pela ventilação híbrida (SALCIDO; RAHEEM; ISSA, 2016). Os trabalhos são bem variados, e se referem tanto a estudos de caso de edifícios específicos, com sistemas complexos de ventilação natural, quanto à modelagem de edifícios de modo misto em programas computacionais, incluindo algoritmos para o controle automático ou para a simulação do comportamento dos usuários, baseados em estudos de campo. Muitos são os trabalhos relacionados a edifícios de escritórios com o enfoque na redução do consumo energético através da utilização de uma única estratégia. Geralmente eles analisam a utilização da iluminação natural, visando diminuir o gasto de luz elétrica e/ou do ar condicionado, ou a utilização da ventilação natural, substituindo-se os sistemas mecânicos de resfriamento. Contudo, dificilmente são encontradas soluções que integram essas duas estratégias passivas, sendo que essa integração poderia ser realizada através da área de abertura na fachada (COTTA; VIEIRA in GONÇALVES; BODE, 2015; GHISI; TINKER, 2005; OCHOA et al., 2012; TIAN et al., 2010). Desenvolvidos no Brasil, os trabalhos e resultados que se destacam, que utilizam da integração da ventilação híbrida com a iluminação natural e artificial em edifícios de escritórios foram desenvolvidos pelos autores Rupp

(2011), Rupp e Ghisi (2012, 2013) e Brugnera, Roriz e Chvatal (2016)¹, para as cidades de Florianópolis e São Carlos.

Rupp (2011) e Rupp e Ghisi (2012, 2013) analisaram diferentes modelos de salas de escritórios através da simulação computacional. Comparando-se um ambiente que se utiliza da ventilação híbrida e iluminação artificial eficiente com o mesmo ambiente utilizando ar condicionado e iluminação artificial de modo constante, os autores chegaram a alcançar uma redução entre 21,7 e 64,9% do consumo total de energia elétrica nos modelos para a cidade de Florianópolis. No relatório interno de Brugnera, Roriz e Chvatal (2016), também através da simulação computacional, os autores compararam um modelo de sala com variações de área de abertura na fachada e orientação solar, para um caso com a ventilação híbrida e iluminação artificial eficiente e para outro caso com o uso do ar condicionado de maneira constante e sistema de iluminação eficiente, o que deixou mais evidente o potencial de economia da ventilação híbrida. O impacto da utilização da ventilação híbrida foi mostrado nos resultados, onde foi possível reduzir em 30% o consumo do ar condicionado, representando uma redução de 26% do consumo da energia total anual da sala, para a cidade de São Carlos.

Portanto, o presente estudo se refere ao uso conjugado de estratégias de ventilação híbrida e iluminação natural integrada com a artificial, em saletas comerciais de edifícios de escritórios com janelas operáveis por usuários ativos e uso do ar condicionado comum, na cidade de São Paulo. A ventilação pode ocorrer sempre que as condições climáticas externas forem favoráveis e o sistema mecânico de condicionamento do ar deve ser acionado quando a temperatura interna não for agradável, fatos que na realidade poderiam ser indicados através de um sensor. Essa é uma realidade compatível com uma considerável parte dos escritórios e climas no Brasil e visa contribuir com as principais lacunas encontradas na literatura referente a edifícios de modo misto. Avaliou-se, por meio de simulação computacional, a influência de parâmetros de projeto no consumo de energia e no conforto visual nessas saletas comerciais com as características supracitadas. Foram utilizados, como programas principais, o *EnergyPlus*, para a análise energética, e o *DIVA-for-Rhino*, para a análise lumínica, sendo um *plug-in* mais recente que integra o *RADIANCE/Daysim*. Desta forma, o estudo orienta a incorporação de estratégias

¹ BRUGNERA, R. R.; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M.S. Análise crítica, aprofundamento e outras questões da Dissertação de Mestrado de Brugnera 2014, intitulada: Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com estratégias de ventilação híbrida. São Carlos: USP, 2016. Relatório interno.

de ventilação híbrida e iluminação natural no desenvolvimento do projeto arquitetônico, que resultem em uma maior economia de energia em salas comerciais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência de parâmetros de projeto (forma da sala, tamanho e orientação das aberturas) no consumo de energia e no conforto visual de saletas comerciais com ventilação híbrida e integração da iluminação natural e artificial na cidade de São Paulo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar os principais fatores intervenientes no equilíbrio térmico e no funcionamento do tipo de edifício em questão.
- Fornecer informações para a concepção de edifícios de saletas comerciais que considerem a ventilação híbrida e o aproveitamento integrado da luz natural com a artificial.

1.2 Estrutura da dissertação

O primeiro capítulo apresenta uma parte introdutória, com a justificativa da pesquisa, objetivos e estrutura da dissertação. O segundo capítulo traz a revisão bibliográfica. No terceiro capítulo é descrita a metodologia de trabalho e no quarto são apresentados os resultados das simulações e discussão. O quinto capítulo apresenta as conclusões e propõe sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo é composto pela revisão de literatura do trabalho, contendo os principais tópicos que englobam o tema da pesquisa. Ao longo do texto foram levantadas e discutidas questões sobre os edifícios de escritórios, a iluminação natural, a ventilação híbrida e a integração desses dois sistemas, além dos programas de simulação mais utilizados que envolvem o referido assunto.

2.1 Contextualização

No Brasil, entre o ano de 2013 e 2014, apesar do crescimento do consumo de energia elétrica (2,9%) ser inferior ao de geração de energia (3,4%) essa relação não é suficiente devido às perdas decorrentes, sendo preciso realizar a importação deste recurso para atender toda a demanda, que cresceu em 2,1% (EPE, 2015). Diante deste contexto, do total de energia elétrica gerada pelo país, neste período, 42,5% foi destinado para edifícios residenciais, comerciais e públicos (EPE, 2015), mostrando a necessidade de se encontrar alternativas energéticas direcionadas às edificações.

No setor comercial brasileiro, especificamente, nos edifícios de escritórios, o consumo energia elétrica destinada para o ar condicionado pode chegar a 47% do total consumido e para a iluminação artificial, 22% (ELETROBRÁS, 2007 apud LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Estes altos valores estão relacionados ao estilo arquitetônico internacional, no qual a maioria dos edifícios é caracterizada por enormes fachadas envidraçadas e sistemas sofisticados de ar condicionado. Estes sistemas mantêm constantes as condições térmicas e desconsideram os aspectos bioclimáticos locais, gerando um grande consumo de energia elétrica e impacto ambiental, devido ao resfriamento necessário para neutralizar o alto ganho de calor interno com os ocupantes, luzes e equipamentos (BRAGER; RING; POWELL, 2000; DRAKE et al., 2010; EZZELDIN; REES, 2013).

Desta forma, é preciso resgatar o uso de estratégias bioclimáticas, reduzindo o consumo de energia gasto pelos sistemas artificiais de iluminação e climatização, aumentando a eficiência energética da edificação.

2.2 Edifícios de escritórios

Atualmente, os edifícios comerciais altos, selados hermeticamente e com as chamadas "peles de vidro" são utilizados por vários países e considerados uma questão de status e de superioridade em relação aos outros edifícios. Contudo, geralmente esse tipo de edificação tem como consequência um elevado consumo de energia elétrica e um ambiente não saudável, devido ao uso do ar condicionado de forma constante (ROAF; CRICHTON; NICOL, 2009).

Nos Estados Unidos, em média, um usuário padrão de uma sala de escritório deixa de trabalhar um dia por mês devido a problemas relacionados ao equipamento de condicionamento artificial de ar, como a falta de limpeza de seu interior, criação de mofo, acumulação de particulados e até mesmo produtos químicos que podem ser exalados para o ambiente. Fato este que não é observado na Europa, onde os edifícios de escritórios dependem menos do aparelho (ROAF; CRICHTON; NICOL, 2009).

Evitar edificações que dependam totalmente do sistema de ar condicionado para manter as condições térmicas aos usuários vem ganhando destaque, concedendo lugar às naturalmente ventiladas e de modo misto (MENDLER; ODELL; LAZARUS, 2006; ROAF; CRICHTON; NICOL, 2009). Não existem regras universais para que um projeto de escritório consiga atingir um alto desempenho termo-energético e seja um ambiente favorável para a produtividade, conforto e saúde dos usuários, mas sim, algumas diretrizes, que podem ser observadas e utilizadas em cada caso (BATTLE, 2003).

2.2.1 Tipologias

Os edifícios de escritórios, grandes ou pequenos, irão continuar se expandindo nas cidades, simbolizando e dando suporte para o sistema de trabalho contemporâneo (BATTLE, 2003). Desta forma, a edificação torna-se responsável por fornecer um ambiente adequado para as atividades presentes nesse setor. Existem vários tipos de edifícios de escritórios e uma das formas de classificá-los é através de sua solução espacial (*layout*). Segundo Gurgel (2005), três grupos gerais se destacam, sendo eles:

- a) Escritório convencional: proposta antiga e que se adapta à necessidade, principalmente, das menores empresas. Composto basicamente, por salas

individuais ou, de pelo menos, uma sala para a gerência, uma direcionada aos funcionários e uma para a secretária.

b) Escritório de planta livre: possui diferentes nomenclaturas e representa um ambiente que utiliza divisórias baixas com móveis em sistemas integrados ou modulares, criando estações de trabalho funcionais. É um conceito que se adapta a qualquer modalidade de empresa, aproveitando ao máximo o espaço disponível e permitindo uma maior flexibilidade. Contudo, essa tipologia pode ocasionar uma falta de privacidade dos funcionários e problemas acústicos.

c) Novo escritório: considerada a mais utilizada atualmente, trata-se de uma tipologia composta por um misto de espaços. Nesses edifícios de escritórios pode haver ambientes: totalmente abertos (integram alguns setores da empresa); salas fechadas para reunião (permitem uma maior privacidade); salas para videoconferências; e espaços comuns para socialização. A parte da recepção pode ser um ambiente desconectado, sendo que geralmente em edifícios maiores, ela está localizada no nível térreo, onde é feita a triagem para todos os escritórios localizados no edifício, funcionando também como uma sala de espera.

Dentro da tipologia de edificação mais empregada atualmente no Brasil, o chamado Novo escritório, destacam-se dois ambientes específicos de trabalho, as denominadas saletas/salas comerciais (*Offices*), com áreas menores que 100 m², em média, e as lajes corporativas/planta livre (*Corporates*), com áreas maiores (informação pessoal)². Apesar de não haver um padrão específico de projeto para esses dois ambientes, a saleta comercial está mais relacionada ao modelo de salas em edifícios comerciais da Europa, enquanto que a laje corporativa possui uma ligação maior com salas nos modelos dos Estados Unidos (BATTLE, 2003). Nos edifícios comerciais europeus, as salas costumam ter uma profundidade de até 13,5 metros, com um maior controle da iluminação e ventilação naturais pelos usuários, reduzindo o consumo energético do edifício (BCO, 2000 apud BATTLE, 2003). Enquanto que, no modelo americano, as profundidades das salas podem atingir mais que 21 metros e se utilizam de sistemas de condicionamento e iluminação

² DIDZIAKAS, F. Diferença das dimensões entre saletas comerciais (*Offices*) e lajes corporativas (*Corporates*) utilizada pela empresa Buildings: primeira empresa brasileira especializada em pesquisa imobiliária corporativa, fundada em 2007. Mensagem recebida por caroline.santesso@usp.br em 18 abr. 2016.

artificial, mantendo constantes as condições ambientais, o que resulta em um alto consumo energético (BCO, 2000 apud BATTLE, 2003).

O fato das saletas comerciais possuírem menor dimensão e profundidade do que as lajes corporativas proporciona um maior uso da iluminação e ventilação naturais, devido às próprias limitações destes fenômenos. Além disso, esse ambiente fornece uma maior autonomia ao usuário, para que ele se adapte e mantenha o conforto necessário, não sendo necessário depender a todo o momento, do uso do ar condicionado e da iluminação artificial (MENDLER; ODELL; LAZARUS, 2006). A Figura 1 apresenta exemplos de edificações reais com saletas comerciais, localizadas na cidade de São Paulo.



Figura 1 - Edificações com saletas comerciais
Fonte: Elaborada a partir de Buildings (2016)

2.2.2 Conforto térmico e o comportamento dos usuários

As variações ambientais, construtivas e a tipologia de um edifício de escritório influenciam na produtividade e na satisfação dos usuários, que dependem de um ambiente agradável para realizar suas tarefas de forma eficaz. O conforto térmico dos usuários está relacionado ao equilíbrio térmico do corpo humano em determinado ambiente, considerando condições humanas e ambientais, como a taxa metabólica do indivíduo, isolamento térmico da

vestimenta, temperatura radiante média, umidade relativa e a temperatura e velocidade do ar (FIGUEIREDO; FROTA, 2016; FROTA; SCHIFFER, 2001).

Porém, segundo Leaman e Bordass (2007), geralmente os usuários tendem a não se preocupar com o conforto em si, mas sim com o desconforto, reagindo quando se atinge uma "crise". Essa reação pode ser em relação a: ajustar ou pedir o ajuste de janelas e persianas; utilizar o aquecimento e/ou resfriamento do sistema de climatização e ventilação e; alterar a vestimenta ou trocar de lugar. Cada indivíduo possui limites de tolerância muito diferentes, conseqüentemente respondem em momentos e formas diferentes, passivamente ou ativamente. De forma ideal, os usuários deveriam ser capazes de lidar com a fonte de seu desconforto, de maneira rápida e fácil, porém isso normalmente só é possível em espaços ocupados por uma pessoa, com muitas opções de controlar o aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação. O controle individual do ambiente em edifícios de escritórios tem se tornado cada vez menor, principalmente quando há o condicionamento artificial constante durante todo o período. E os poucos usuários que possuem mais controle sobre as condições ambientais tendem a ficar mais satisfeitos (LEAMAN; BORDASS, 2007).

Em edifícios naturalmente ventilados, segundo Figueiredo e Frota (2016), as flutuações na temperatura podem produzir sensações de conforto com temperaturas do ar mais altas que aquelas nomeadas com condições constantes em ambientes com ar condicionado. Isso ocorre devido à redução da temperatura percebida pelas pessoas (através da evaporação do suor da pele e das trocas convectivas entre a corrente de ar e o corpo humano) fazendo com que elas "suportem" temperaturas maiores (FIGUEIREDO; FROTA, 2016; LEAMAN; BORDASS, 2007). Em um estudo realizado por Leaman e Bordass (2007) no Reino Unido com diferentes tipos de edifícios, verificou-se que a maior influência no desconforto foi devido ao incômodo com situações de muito calor ou muito frio. Comparando-se edifícios naturalmente ventilados (NV), edifícios com ar condicionado (AC) e edifícios de modo misto (MM), que podem utilizar tanto a ventilação natural como o ar condicionado, os usuários consideraram que, no verão os edifícios NV são muito quentes, apesar de haver uma maior tolerância com o aumento e flutuação de temperatura, enquanto que os com AC são muito frios. Por outro lado, no inverno, edifícios NV são considerados muito frios e os AC muito quentes, ficando com um maior equilíbrio os edifícios MM, responsáveis pela união das estratégias.

A avaliação do conforto térmico dos usuários de acordo com o tipo do edifício pode ser realizada principalmente segundo as normas internacionais e seus respectivos índices. Atualmente elas podem ser divididas para ambientes climatizados artificialmente e para construções naturalmente ventiladas. O Voto Médio Predito (*Predicted Mean Vote*, PMV) e a Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (*Predicted Percentage of Dissatisfied*, PPD), por exemplo, são índices adotados por versões mais antigas de normas internacionais, como a ASHRAE 55 (1992) e ISO 7730 (1998). Esses índices são indicados para edifícios que possuem o condicionamento artificial, já que os principais critérios não consideraram que as pessoas, quando submetidas a condições de desconforto térmico, podem tomar medidas para se adaptarem. Com a intenção de ampliar o uso das normas a ASHRAE 55 (2013), apresenta um índice proposto por De Dear e Brager (1998), baseado na teoria adaptativa de conforto térmico, com benefícios que envolvem o controle de abertura das janelas pelos usuários e o aumento dos limites de velocidades internas do ar, sendo indicada, portanto, para edifícios naturalmente ventilados (DE VECCHI, 2015; FIGUEIREDO; FROTA, 2016).

Para edifícios de modo misto atualmente não há um método específico para a avaliação do conforto térmico (DE VECCHI, 2015). Várias pesquisas analisam qual dos métodos existentes se adapta para esse caso enquanto não existe uma norma específica, sendo as normas que consideram o conforto adaptativo as mais indicadas, como a ASHRAE 55 (2013) e a norma europeia EN 15251 (2007) (DE VECCHI, 2015; DEUBLE; DE DEAR, 2012; WANG; GREENBERG, 2015). Sem um método específico, estudos experimentais são realizados adotando diferentes normas, comparando-as e observando o conforto térmico dos usuários e o comportamento dos mesmos, em relação ao acionamento do ar condicionado e o período em que é utilizada a ventilação natural. Nessas edificações, é muito presente na literatura a utilização de uma temperatura de controle (*setpoint*) do ar condicionado para o resfriamento em torno de 25°C (BRUGNERA, 2014; DE VECCHI, 2015; DEUBLE; DE DEAR, 2012; DRAKE et al., 2010; KARAVA et al., 2012). Enquanto que, as temperaturas internas em que ocorre a abertura e fechamento das janelas estão em constante discussão.

Em uma pesquisa realizada em Sydney, na Austrália, com saletas comerciais com janelas operáveis e ar condicionado central acionado sempre quando as temperaturas atingissem 25°C, observou-se que, entre 20°C e 25°C as salas

funcionavam em sua maior parte do tempo com a ventilação natural (DEUBLE; DE DEAR, 2012). No Brasil, com os estudos de Brugnera, Roriz e Chvatal (2013) na Universidade de São Paulo em São Carlos, observou-se em salas de trabalho da Instituição que o ar condicionado era acionado na maior parte do tempo no período da manhã e quando a temperatura interna estava entre 24 a 26 °C, sendo abertas as janelas mais no período da tarde, ao se desligar o ar condicionado. Mais pesquisas na área de conforto térmico dos usuários devem ser realizadas, assim como a análise do comportamento dos usuários e as relações térmicas que influenciam no desempenho térmico de edificações de modo misto, para que essa tipologia seja mais utilizada, já que traz benefícios não só econômicos, mas também ambientais e sociais.

2.2.3 Eficiência energética e o RTQ-C

No guia para construções mais sustentáveis de Mendler, Odell e Lazarus (2006) os autores indicam algumas diretrizes orientando a elaboração de um projeto que se encaixe com o ambiente em que está inserido, contribuindo para o conforto dos usuários e para a economia de energia. Para edifícios de escritório, eles apontam a importância de se observar alguns elementos que podem ser incorporados, como:

- a) Noções de ambiente e energia: utilizar conhecimentos básicos para o processo de projeto - orientação, massa térmica, área do piso, altura e profundidade - obtendo um maior impacto na redução do custo de energia. Quando é possível, o objetivo deve ser produzir uma área de piso estreita, respondendo à orientação adequada para cada localização.
- b) Considerações do envelope: analisar melhorias no envelope externo da construção e potenciais reduções dos sistemas mecânicos através de um processo integrado. O envelope externo deve maximizar o controle do uso da iluminação natural enquanto reduz o ganho e a perda de calor pelo perímetro, assim como estratégias devem ser desenvolvidas que permitam a ventilação natural nas estações mais leves do ano.
- c) Luz natural: projetar buscando fornecer para todo usuário o acesso para a iluminação natural e a vista exterior. Controles devem estar interligados

à iluminação artificial, para que assim, quando se utiliza a luz do dia, se economize energia.

- d) Ventilação: sempre se utilizar da ventilação natural ou híbrida quando as condições externas são favoráveis.
- e) Janelas: considerar janelas operáveis para o controle pelos usuários, aumentando a satisfação dos mesmos, além da qualidade do ar.

Verifica-se que as estratégias passivas e as características construtivas citadas, além de fornecerem um ambiente mais agradável aos usuários, também geram economia de energia, que pode aumentar com sistemas eficientes nas edificações. Com o objetivo de estimular a construção de edificações comerciais mais eficientes energeticamente surgiu o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos - RTQ-C, parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) do Inmetro, que fornece uma classificação de edifícios (de A até E), através da determinação da eficiência de três sistemas principais (INMETRO, 2014):

- a) Envoltória: observando as características físicas da construção, como os componentes opacos (cobertura e fachada), dispositivos de iluminação zenital e aberturas verticais, compondo a "pele" da edificação, além de se verificar o volume, a área de piso da edificação e a orientação das fachadas.
- b) Iluminação: verifica-se a densidade de potência a ser instalada pela iluminação interna, de acordo com as diferentes atividades exercidas pelos usuários de cada ambiente. Uma menor potência instalada indica uma menor energia consumida e maior eficiência, desde que sejam garantidas as condições adequadas de iluminação.
- c) Condicionamento de ar: pode ser analisado de duas formas, a primeira está relacionada aos sistemas individuais que já possuem a classificação de eficiência do INMETRO, e a segunda os sistemas que não tem a classificação, como o ar condicionado central, que é mais complexo, sendo necessário seguir prescrições definidas no regulamento.

Adicionalmente, o regulamento permite a análise da ventilação natural. Assim, para avaliar esses quatro sistemas podem ser utilizados dois métodos, o

prescritivo e o de simulação, dependendo da complexidade do edifício. A partir da Tabela 1 é indicado como cada um dos sistemas pode ser avaliado e sua respectiva combinação. Observa-se que a ventilação natural, por ser mais complexa, deve ser analisada sempre pelo método de simulação enquanto que, nos outros parâmetros, pode ser adotado tanto o método de simulação, quanto o prescritivo (INMETRO, 2014).

Tabela 1 - Métodos para se analisar a eficiência energética de cada sistema

Combinação	Envoltória	Iluminação	Condicionamento de ar	Ventilação Natural
1	Prescritivo	Prescritivo	Prescritivo	Simulação
2	Simulação	Simulação	Simulação	Simulação
3	Simulação	Prescritivo	Prescritivo	Simulação

Fonte: RTQ-C (INMETRO, 2014)

Pelo método prescritivo obtém-se o nível de eficiência total do edifício a partir de uma somatória do valor equivalente das eficiências de cada item, suas respectivas porcentagens de contribuições e os requisitos mínimos. Pelo método de simulação é necessário um programa computacional de simulação termo-energética, que observe, a cada hora, as cargas térmicas e os efeitos de inércia térmica do edifício. O método prescritivo muitas vezes pode superestimar os resultados enquanto que o método de simulação é considerado mais completo e preciso, porém mais complexo (VELOSO; DE SOUZA; KOURY, 2013).

Assim, com o RTQ-C (INMETRO, 2014), o projetista pode verificar vários requisitos em relação à envoltória, iluminação e o condicionamento do ar do ambiente (artificial ou não) para conseguir uma maior eficiência, escolhendo o melhor método para cada situação. A Tabela 2 apresenta os principais requisitos e restrições no quesito da envoltória da edificação. Nela são indicados valores máximos de transmitância térmica e absorvância solar que a cobertura e as paredes externas devem manter, de acordo com cada zona bioclimática brasileira em que a edificação está inserida para que se obtenha uma eficiência energética nível A.

A norma também fornece um limite máximo aceitável de densidade de potência de iluminação (DPI_L) de acordo com a atividade da edificação. Para um edifício de escritório que possua até três atividades principais (ou que as salas de trabalho ocupem mais de 30% da área do edifício) é indicado o uso de um sistema eficiente com a potência máxima de $9,7 \text{ W/m}^2$ para conseguir o nível A,

verificando-se a iluminância mínima necessária para esse tipo de atividade (INMETRO, 2014).

Os dados para o condicionamento de ar artificial podem ser obtidos através de aparelhos etiquetados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) - sistemas individuais e *Split*, seguindo sua classificação (de A a E), ou a partir das indicações para os sistemas mais complexos – sistemas centrais, que mostram uma faixa de valores de acordo com a capacidade do sistema a eficiência dos mesmos. Quando o edifício não for condicionado artificialmente, é necessário realizar o processo de simulação e comprovar o conforto térmico dos usuários seguindo as condições do manual (INMETRO, 2014). Conclui-se que, o regulamento pode ser utilizado para que sejam feitos projetos de edifícios de escritório mais eficientes do ponto de vista energético e, apesar dele ainda não ser obrigatório, está sendo inserido cada vez mais nas edificações brasileiras.

Tabela 2 - Requisitos obrigatórios do RTQ-C para envoltórias com janelas laterais

Características	Componentes	Zonas Bioclimáticas	Valores	Observações
Transmitância térmica	Cobertura	1 e 2	0,50 W/m ² K	Condicionados artificialmente
			1,00 W/m ² K	Não condicionados
		3 a 8	1,00 W/m ² K	Condicionados artificialmente
			2,00 W/m ² K	Não condicionados
	Paredes Externas	1 e 2	1,0 W/m ² K	-
			3 a 6	3,7 W/m ² K
		7 a 8	2,5 W/m ² K	Capacidade térmica máxima de 80 kJ/m ² K
			3,7 W/m ² K	Capacidade térmica superior a 80 kJ/m ² K
Cores e absorvância das superfícies	Materiais de revestimento externo em paredes externas	2 a 8	< 0,50	Absorvância solar baixa
	Em coberturas	-		Absorvância solar baixa, telhas cerâmicas não esmaltadas, teto jardim ou reservatórios de água.

Fonte: Elaborada a partir de INMETRO (2014)

2.3 Iluminação natural

Para uma arquitetura mais eficiente energeticamente integrada com o clima local, a utilização da iluminação natural é uma estratégia importante. O seu aproveitamento em edifícios de escritório além de proporcionar ao ambiente uma iluminação de melhor qualidade, garantindo que seus níveis sejam adequados para as atividades dos usuários, diminui a dependência do uso da iluminação artificial (DIDONÉ; PEREIRA, 2010; VIANNA; GONÇALVES, 2007).

Segundo Vianna e Gonçalves (2007), a partir de tal estratégia é possível obter uma iluminação necessária durante 80 a 90% das horas diurnas. Em conjunto, existe um potencial de economia de 30 a 70% de energia elétrica, devido à diminuição período de utilização da iluminação artificial e/ou sua intensidade, dependendo das condições de instalação, eficiência e da localização do edifício (VIANNA; GONÇALVES, 2007). Portanto, é necessário compreender fundamentos básicos da iluminação natural para se consiga obter seu maior potencial, atingindo benefícios significativos para os projetos de edifícios comerciais.

2.3.1 Características

Em uma edificação, a escolha em se utilizar e/ou evitar a luz e o calor provenientes do sol deve ser realizada visando alcançar um conforto visual e térmico dos ocupantes, juntamente com a economia energética (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Contudo, normalmente os projetistas dão prioridade apenas para um dos fatores (luz ou calor), deixando o outro para ser resolvido com alternativas artificiais, que podem consumir uma elevada energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Desta forma, para encontrar o equilíbrio entre o conforto visual e térmico na decisão de projeto é necessário o entendimento integrado dos conceitos e de variáveis básicas presentes na iluminação natural.

Proporcionar o conforto visual em um ambiente é permitir que o usuário realize suas atividades com precisão, não prejudicando a visão e com menor risco de acidentes (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Para isso é necessário, por exemplo, que o local tenha uma iluminância³ suficiente, com boa distribuição na área de trabalho e não ocasione desconforto devido ao ofuscamento (EUROPEAN

³ Grandeza da iluminação definida pela densidade do fluxo luminoso que atinge determinada superfície. Ou seja, é a razão do fluxo luminoso (lúmen) pela área (m²), normalmente expressa em lux (lx) (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975).

COMMISSION, 1994). A iluminância suficiente, segundo a Norma NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) se refere ao nível adequado de iluminação dependendo do uso. Assim, a norma apresenta um índice com valores de iluminâncias médios que estão relacionados com o tipo de tarefa a ser desenvolvida, o usuário e o local de trabalho. Os níveis para iluminação em edifícios de escritório podem variar de 200 a 750 lx, de acordo com os critérios acima mencionados, de maneira que para ambientes onde ocorrem atividades de escrever, teclar, ler e processar dados é indicado manter uma iluminância de 500 lx, conforme consta na Tabela 3 (ABNT, 2013).

Tabela 3 – Ambientes, tarefas e atividades com a especificação da iluminância

Escritórios	Lux
Arquivamento, cópia, circulação, etc	300
Escrever, teclar, ler, processar dados	500
Desenho técnico	750
Estações de projeto assistido por computador	500
Salas de reunião e conferência	500
Recepção	300
Arquivos	200

Fonte: Adaptada de ABNT (2013)

Quando não há o uso adequado da iluminação natural, podem ocorrer consequências negativas, como o ofuscamento, ocasionado devido à iluminação excessiva e/ou uma distribuição desfavorável de luz e brilho (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). Esse fenômeno é uma sensação visual produzida por áreas brilhantes dentro do campo de visão que reduz a capacidade de distinguir detalhes ou objetos. Pode causar somente um desconforto, geralmente devido às luminárias brilhantes ou janelas no interior de locais de trabalho, como também inabilitar a visão. O último aspecto é mais recorrente na iluminação exterior, contudo pode ocorrer no interior quando há uma iluminação pontual ou fontes de brilho intenso (ABNT, 2013).

Não somente relacionada com o conforto visual, a luz proveniente do sol também representará um ganho de calor para o edifício, em menor ou maior escala (FROTA; SCHIFFER, 2001). Portanto, também é necessário haver o cuidado com as elevadas iluminâncias ao se aumentar a área envidraçada de uma edificação, que pode gerar tanto o risco de ofuscamento como um elevado ganho térmico (NABIL; MARDALJEVIC, 2006). Assim, o entendimento básico dos conceitos e

fenômenos mencionados é importante, atentando-se às características de cada localidade, já que a iluminação natural pode variar em função da condição do céu, posição do sol, época do ano, latitude, entre outros fatores (AMORIM et al., 2011; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; VIANNA; GONÇALVES, 2007).

2.3.2 Análise em interiores

Para se avaliar a iluminação natural quantitativamente e/ou qualitativamente em uma edificação existem várias métricas estáticas e dinâmicas (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). O Fator de Luz Diurna (*Daylight Factor, DF*), por exemplo, é uma métrica estática que indica a razão entre a iluminância interior, em um dado ponto com uma determinada altura, pela exterior, em um local desobstruído e com um céu encoberto (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). Essa métrica é muito utilizada por projetistas, pois permite uma avaliação rápida do fenômeno, contudo, deixa de verificar vários parâmetros importantes, como a sazonalidade da luz diurna (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006).

Diferentemente das métricas estáticas, as métricas dinâmicas são baseadas em séries temporais, de iluminâncias ou luminâncias, geralmente estendidas para o ano inteiro e fundamentadas em dados com radiação solar externa anual, de acordo com a localização do edifício (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). Para realizar esse tipo de análise podem ser utilizados algoritmos em programas de simulação computacional, como o *RADIANCE*, sendo necessário dimensionar uma malha de pontos com sensores distribuídos no interior do ambiente (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). Geralmente esses pontos são posicionados na altura do plano de trabalho e a partir de determinados critérios, indicam se a situação da iluminação no sensor é adequada no decorrer do ano (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006).

Vários critérios podem ser utilizados para a avaliação desse processo dinâmico, sendo que a Autonomia de Luz Diurna (*Daylight Autonomy, DA*) e a Iluminância Útil da Luz Natural (*Useful Daylight Illuminance, UDI*) são considerados os mais utilizados (REINHART; WIENOLD, 2011). O critério *DA* indica o tempo em que há luz natural suficiente para os usuários de acordo com um nível definido de iluminância mínima. Geralmente este indicador é dado em percentual em relação às horas anuais ocupadas, ou seja, 90% de *DA*, significa que em determinado

ponto, durante o período ocupado no ano se utiliza 90% de iluminação natural e apenas 10% de iluminação artificial (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006).

Por outro lado, o critério *UDI*, proposto por Nabil e Mardaljevic (2005), indica o período em que intervalos de valores de iluminâncias são alcançados, não somente um único valor. Assim, é possível observar em cada ponto, o tempo do período ocupado em que a iluminância foi insuficiente (menor que 100 lx), útil (entre 100 e 2000 lx) ou muito elevada (maior que 2000 lx). Pontos da sala onde a iluminação permanece por muito tempo com 100 lx são considerados muito escuros, enquanto que pontos onde há mais de 2000 lx, de elevada iluminância, geram o risco de ofuscamento e ganhos internos elevados (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

Esse critério também é dado em percentual em relação às horas anuais ocupadas, porém neste caso, 90% de $UDI > 2000$ lx em um dado ponto ou a partir de uma média de pontos, significa que, durante 90% do período ocupado no ano, a iluminância atinge mais que 2000 lx, e assim para as outras faixas de valores. Com isso é possível realizar uma avaliação da iluminação natural do ambiente como um todo, mostrando o tempo em que o ambiente permanece com a luz do dia com iluminâncias úteis, insuficientes ou muito elevadas ao longo do ano no período ocupado (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

Observa-se que o estudo prévio da iluminação natural para um determinado ambiente é uma tarefa indispensável, devendo-se também verificar as variáveis da edificação, que influenciam no comportamento da luz natural, tais como a dimensão e forma dos ambientes (largura, profundidade e altura), área e forma das aberturas, entre outros fatores (AMORIM et al., 2011; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; VIANNA; GONÇALVES, 2007).

2.3.3 Regras gerais

Existem algumas regras de projeto em relação ao edifício que podem ser utilizadas para se dimensionar um ambiente buscando o maior aproveitamento da iluminação natural. Estas são indicadas na Tabela 4, relacionadas principalmente à profundidade que o ambiente deve ter em relação a altura da janela. A indicação predominante da profundidade do ambiente é de 1,5 até 2,0 vezes a distância da altura do topo da janela (verga).

Tabela 4 - Indicações da literatura internacional sobre a relação da profundidade do ambiente e a altura do topo da janela

Regras para a iluminação natural	Referências Internacionais
A luz natural dentro de um edifício só será significativa em um ambiente com profundidade de 2 vezes o pé-direito de uma fachada envidraçada.	A Green Vitruvius (COFAIGH et al, 1999)
A profundidade máxima de uma 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 part 4 (DIN V 18599,2005)
Uma janela padrão pode transmitir iluminação suficiente para uma profundidade de até 1,5 vezes a altura da janela. Com sistemas refletores este valor pode ser aumentado para 2 vezes ou mais.	Passive Solar Design (US-DOE, 2005)
Manter a profundidade dos ambientes entre 1,5 e 2 vezes a altura da verga da janela para níveis adequados de iluminação e uma distribuição mais balanceada da luz.	Tips for Daylighting (O'CONNOR et al, 1997) e Daylighting Guide for Canadian Commercial Buildings (ENERMODAL, 2002)
Existe uma relação direta entre a altura da verga da janela e a profundidade de penetração da iluminação natural. Uma iluminação adequada normalmente alcança 1,5 vezes a altura da verga da janela, podendo chegar em até 2 vezes considerando-se raios solares diretos.	Daylighting Guide for Buildings (ROBERTSON, 2005)
Para evitar grandes variações entre níveis de iluminância, a distância da parede da janela à parede no interior deveria ser limitada a 2 vezes a altura da verga da janela, considerando vidros incolores.	IESNA Lighting Handbook (IESNA, 2000)

Fonte: Adaptado de Reinhart (2005)

Christoph Reinhart (2005) conseguiu chegar a valores em que a profundidade da sala atingiu a 2,5 vezes a altura da verga, para janelas sem proteções solares, avaliando a iluminação natural em espaços retangulares com parâmetros variáveis (clima, orientações de fachada, geometrias e padrões de uso), utilizando-se de métricas dinâmicas a partir do *RADIANCE*. Por outro lado, um trabalho realizado em Amã, na Jordânia, verificou que, para uma pequena sala de escritório (30,25 m²) com um percentual de área de abertura na fachada (PAF) de 22% e sem proteção solar, a iluminação natural era suficiente até a distância de 3 metros da janela, tendo como diretriz a iluminância de 500 lx para edifícios de escritórios. A partir de três metros era necessário se utilizar a iluminação artificial,

devido ao fato da luz do dia não atender a iluminância mínima, conforme mostra a Figura 2 (ALZOUBI; AL-ZOUBI, 2010). A Tabela 5 sintetiza as recomendações mínimas para realizar um projeto de escritório com maior uso da iluminação natural.

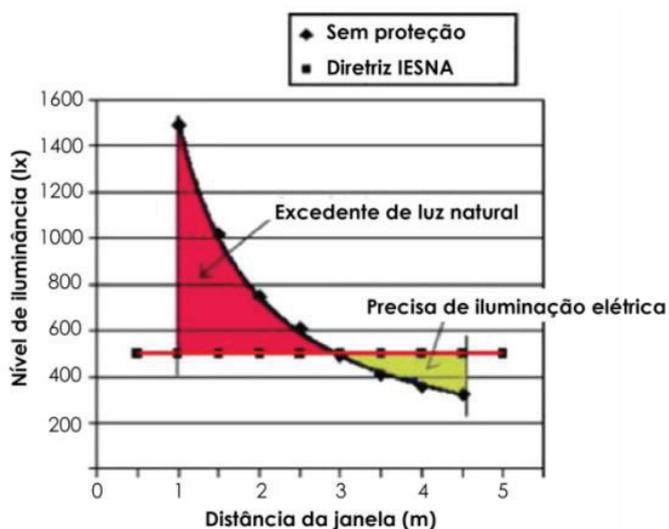


Figura 2 - Curva do nível de iluminância em diferentes distâncias da janela
Fonte: Adaptada de Alzoubi e Al-zoubi (2010)

Tabela 5 - Recomendações mínimas para o uso da iluminação natural no projeto arquitetônico de salas de escritório

Considerações	Conceitos e Variáveis	Referências
	Manter uma iluminância de 500 lx no ambiente	ABNT (2013)
Restrições e exigências do usuário	Evitar elevadas iluminâncias (>2000 lx), que podem causar risco de ofuscamento e altos ganhos internos e as baixas iluminâncias (<100 lx), que podem ser insuficientes para a realização da tarefa	Nabil e Mardaljevic (2005)
Localização	Verificar as variáveis do clima e da localização como: a condição do céu, da posição do sol, época do ano, latitude e entre outros fatores	Amorim et al (2011); Lamberts, Dutra e Pereira (2014); Vianna e Gonçalves (2007)
Edificação	Verificar questões da edificação como: dimensão e forma dos ambientes (largura, profundidade e altura), área e forma das aberturas e entre outros fatores	Amorim et al (2011); Lamberts, Dutra e Pereira (2014); Vianna e Gonçalves (2007)
Formas de análise	Utilizar métricas dinâmicas para avaliar o ambiente como um todo. Os critérios mais utilizados para isso atualmente são: a Autonomia de Luz Diurna (<i>Daylight Autonomy, DA</i>) e Iluminância Útil da Luz Natural (<i>Useful Daylight Illuminance, UDI</i>)	Reinhart e Wienold (2011)

Considera-se, portanto, que as normativas apresentam-se como uma primeira diretriz para o projeto arquitetônico, porém uma análise mais detalhada do ambiente complementa e refina as decisões. Ressalta-se a importância de considerar as restrições e exigências do usuário e as variáveis da localização e da edificação, sendo que quando possível, deve-se utilizar métricas dinâmicas para obter uma avaliação mais precisa do ambiente.

2.3.4 Potencial de economia de energia

Atualmente, há um reconhecimento significativo da contribuição da iluminação natural para a economia de energia dos edifícios, com o destaque na integração apropriada da mesma com a iluminação artificial, já que uma série de benefícios comprova a sua importância no impacto da questão energética (YU; SU, 2015). Promover aos usuários uma alternativa eficiente de baixo custo, com uma eficácia luminosa maior que a iluminação artificial e somente o fato de ser mais sustentável, sem necessidade de produção, são alguns desses benefícios (YU; SU, 2015). Desta forma, foram apresentadas algumas pesquisas científicas que englobam essa questão.

No trabalho de Li e Wong (2007) foram avaliados consumos de iluminação, equipamentos, aquecimento e resfriamento de um edifício em Hong Kong, na China. Através da simulação computacional com o *EnergyPlus* verificou-se que 25% do consumo de iluminação elétrica poderia ser reduzido caso fosse aplicado o controle para a iluminação artificial ao invés de seu uso constante, gerando uma redução do consumo total de energia do edifício de 8,6%. Gentile, Laike e Dubois (2016), realizaram um trabalho mais específico, em salas reais de edifícios de escritórios, equipadas com quatro diferentes sistemas de controle de iluminação artificial na cidade de Lund, Suécia. Assim, para cada sistema combinado com a iluminação natural, verificou-se o potencial de economia de energia em relação ao pior caso (manual com sensores de presença), o comportamento e satisfação dos usuários. Os resultados mostraram que o controle manual aumenta a satisfação dos usuários, sendo que agindo os mesmos de forma consciente ao longo do dia foi possível conseguir uma economia de energia de 75% com sensores de ausência. O sistema dimerizável atingiu uma economia de 79%, não muito distante do controle manual consciente e as lâmpadas de mesa atingiram uma economia de 97%, contudo, não foram suficientes para manter uma iluminação adequada no local.

Ghisi e Thinker (2005) desenvolveram uma metodologia para estimar a área de abertura ideal na fachada de edifícios de escritórios com ar condicionado, considerando o potencial de economia de energia devido à integração da iluminação natural à artificial. O estudo foi realizado para ambientes de escritórios na cidade de Florianópolis, Brasil e na cidade de Leed, Reino Unido. Assim, a partir da simulação com o programa *VisualDOE*, foram realizadas variações nos ambientes em relação à: geometria, variando-se a largura e profundidade (L:P), orientações (norte, sul, leste e oeste) e o percentual de área de abertura na fachada - PAF (de 10 a 100%). A Figura 3 apresenta as variáveis dos modelos nas simulações.

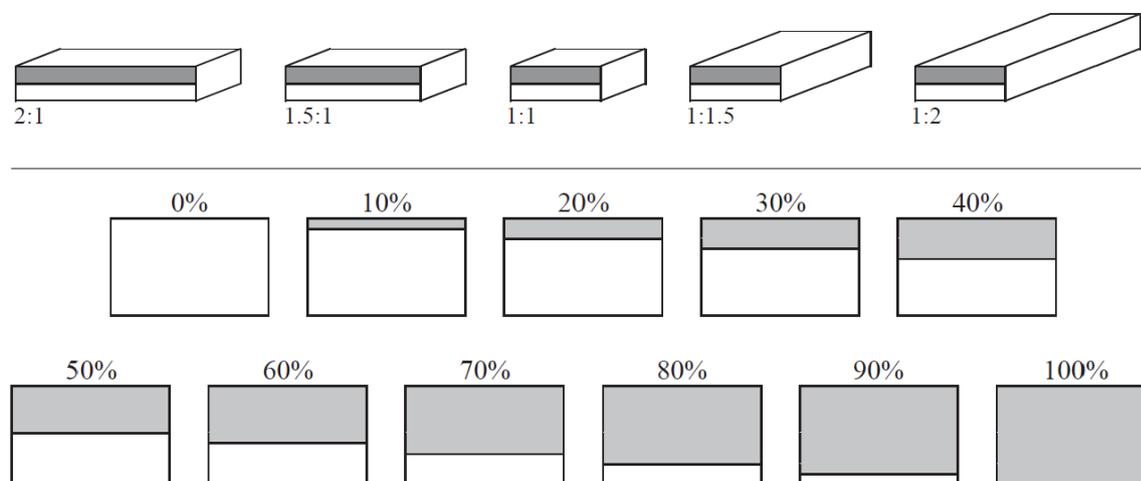


Figura 3 - Diferentes geometrias estudadas e áreas envidraçadas da fachada
Fonte: Adaptado de Ghisi e Thinker (2005)

Com as análises os autores obtiveram valores ótimos de PAF para ambientes com menor consumo de energia. Para a cidade do Reino Unido os PAF's de salas mais largas seriam de 7 a 49% e para as mais profundas de 9 a 87%, com a maior redução no consumo total de energia na fachada norte, economizando de 10,8 a 44%. Enquanto que para Florianópolis os PAF's seriam de 10 a 33% para salas mais largas e para as mais profundas de 20 a 81%, com a maior economia de energia na orientação sul alcançando uma redução do consumo total de 20 até 86 % (GHISI; TINKER, 2005).

Na mesma cidade brasileira, um estudo realizado por Didoné e Pereira (2010) avaliou também o impacto da iluminação natural integrada com sistema dimerizável em relação a um sistema de iluminação artificial constante para salas de escritório. Os autores utilizaram os programas *EnergyPlus* e *Daysim* para as

análises, com modelos que variaram em relação à: profundidade do ambiente, orientação, PAF, fator solar e características de proteções solares. Os modelos bases comparados foram construídos representando uma baixa eficiência na iluminação natural, com iluminação elétrica do tipo on/off, permanecendo ligada durante todo o período de ocupação (8-18h) com o ambiente climatizado artificialmente. Verificou-se que o uso da iluminação natural integrada com o sistema dimerizável de iluminação artificial proporcionou uma redução significativa no consumo de energia final do edifício, de 12 a 52%, tendo influência também no comportamento do ar condicionado, que diminuiu seu consumo devido à redução das cargas internas (pois se minimizou o período de funcionamento da luz elétrica) (DIDONÉ; PEREIRA, 2010).

Desta forma, foram apresentados alguns trabalhos direcionados para a economia de energia com o uso da iluminação natural. Não só presente nestes trabalhos, como em outras pesquisas (FRANZETTI; FRAISSE; ACHARD, 2004; JAKUBIEC; REINHART, 2011; KIM; JEON; KIM, 2016; REINHART; WIENOLD, 2011; SHEN; HU; PATEL, 2014; TAGLIABUE; BUZZETTI; AROSIO, 2012), o enfoque da iluminação natural para ambientes de escritórios geralmente está relacionado ao edifício como um todo ou ambientes que se utilizam do ar condicionado de maneira constante, sendo que seria interessante a união com outras estratégias passivas.

2.4 Ventilação híbrida

A estratégia passiva de ventilação natural é um importante meio para contribuir com a diminuição do consumo de energia e aumentar o conforto térmico dos usuários. Para se realizar um projeto adequado com o uso da ventilação natural é necessário, por exemplo, ter conhecimento dos ventos locais, como a sua velocidade e direção predominante. Também é importante observar o entorno da edificação, verificando-se a existência de muros, barreiras e/ou vegetações, que podem tanto direcionar como impedir uma ventilação eficaz. No edifício devem ser observadas a distribuição espacial e altura, sendo que no seu interior é necessário se verificar os principais fatores que influenciam no fluxo do vento, como o tamanho, a forma e a localização das aberturas na fachada (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008; FIGUEIREDO, 2007).

A avaliação de um ambiente com a ventilação natural não é uma tarefa fácil, devido ao seu contexto dinâmico, sendo indicado utilizar os programas de

simulação termo-energético para obter resultados mais precisos (INMETRO, 2014). A Tabela 6 resume de forma geral as principais variáveis que devem ser observadas ao se realizar um projeto que inclua a ventilação natural.

Tabela 6 - Variáveis a serem observadas para um projeto com ventilação natural

Considerações	Variáveis	Referências
Restrições e exigências do usuário	Verificar o conforto térmico dos usuários através de modelos adaptativos	ABNT (2013)
Localização	Verificar: direção, velocidade e frequência dos ventos; existência de cercas e muros e; presença de vegetação	Bittencourt e Cândido (2008); Figueiredo (2007)
Edificação	Verificar: distribuição espacial da edificação e sua altura; inclinações de beirais e telhados; dimensão e forma dos ambientes internos do edifício (largura, profundidade e altura); dimensão, forma, localização e altura das aberturas; sistema de abertura (manual ou mecânico)	Bittencourt e Cândido (2008); Figueiredo (2007)
Formas de análise	A partir do desempenho termo-energético da edificação (simulação computacional)	INMETRO (2014)

Contudo, em edifícios de escritórios, mesmo que o projeto seja feito para o seu máximo aproveitamento, existem horas em que as condições de temperatura, umidade e/ou qualidade do ar externo podem não permitir que o conforto térmico seja alcançado no ambiente, devido aos altos ganhos internos, não sendo a ventilação natural suficiente para remover o calor em excesso (BRAGER, 2006; BRAGER; RING; POWELL, 2000; LOMAS; COOK; FIALA, 2007; TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010). Uma solução que está se expandindo em edifícios comerciais é a integração da ventilação natural aos sistemas de condicionamento artificial de ar, em locais com baixo ruído externo e com pequeno índice de poluentes, a fim de se promover o maior conforto dos usuários quando a estratégia passiva não é suficiente. Esse sistema é denominado de "ventilação híbrida" ou de "modo misto" (BRAGER; RING; POWELL, 2000).

2.4.1 Definições

A classificação mais utilizada e simplificada para os edifícios de modo misto pode ser dividida em, de acordo com o Center for the Built Environment - CBE (2016):

- a) Sistema simultâneo ou concorrente: a ventilação natural e o sistema mecânico estão presentes no mesmo espaço e podem atuar ao mesmo tempo, ou seja, o condicionamento artificial pode ser utilizado ao mesmo tempo em que os ocupantes podem abrir as janelas, de acordo com sua preferência, conforme indica a Figura 4. Edifícios de escritórios de plantas livres e com sistemas de condicionamento artificial central são exemplos típicos desse sistema. Apesar de ser possível diminuir a potência do ar condicionado ao se abrir a janela, esse sistema tem o enfoque maior no conforto dos usuários.

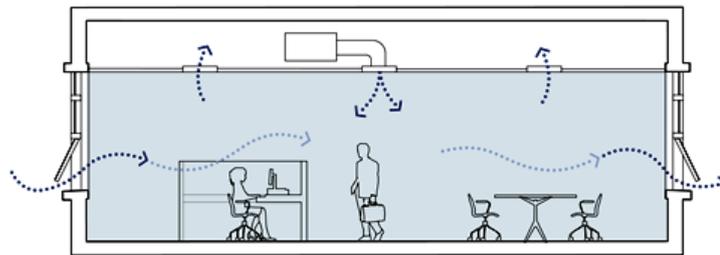


Figura 4 - Sistema simultâneo
Fonte: CBE (2016)

- b) Sistema de zoneamento: a ventilação natural e o sistema de climatização funcionam ao mesmo tempo, contudo em espaços separados (diferentes zonas térmicas). Nesse sistema em um mesmo edifício algumas salas possuem ventilação natural e outras o ar condicionado, o que pode reduzir o consumo total do edifício. Porém nas salas somente com a ventilação natural pode haver um maior desconforto em determinadas horas, assim como na sala somente com ar condicionado pode ocorrer insatisfação dos usuários. Alguns exemplos com esse sistema são edifícios de escritórios naturalmente ventilados (janelas operáveis), porém com ambientes (salas de conferência, por exemplo) onde existe resfriamento e/ou aquecimento artificial por meio de dutos ou outro sistema suplementar mecânico, conforme mostra a Figura 5.

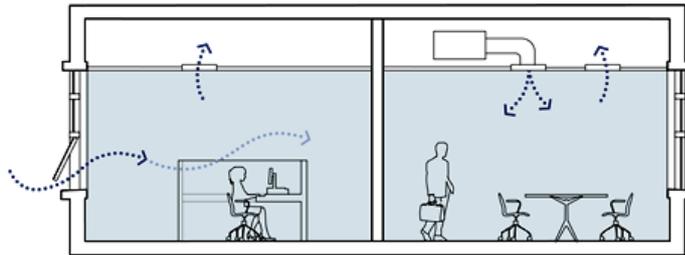


Figura 5 - Sistema por zoneamento
Fonte: CBE (2016)

- c) Sistema alternado ou de conversão: a ventilação natural e o condicionamento artificial de ar atuam em um mesmo espaço, porém em tempos diferentes, exemplificado na Figura 6. Essa estratégia está se tornando cada vez mais utilizada e ocorre quando a ventilação natural não está sendo eficaz. Ao se acionar o ar condicionado as janelas são fechadas, podendo ocorrer essa troca ao longo do dia ou em determinada época do ano. Os edifícios que fazem uso desse sistema visam à manutenção de um ambiente interno satisfatório e propõem a variação entre sistemas naturais e mecânicos a fim de se evitar custo e alto consumo de energia sempre que as condições climáticas externas forem favoráveis (DRAKE et al., 2010). Caso esteja presente, um sistema de automação pode determinar o modo de funcionamento com base na temperatura externa, sensores de ocupação, comandos do operador ou a partir da abertura ou o fechamento de janelas. Exemplos típicos envolvem salas de escritórios individuais, com janelas operáveis e aparelhos de ar condicionado que podem desligar sempre que um sensor indica que uma janela foi aberta.

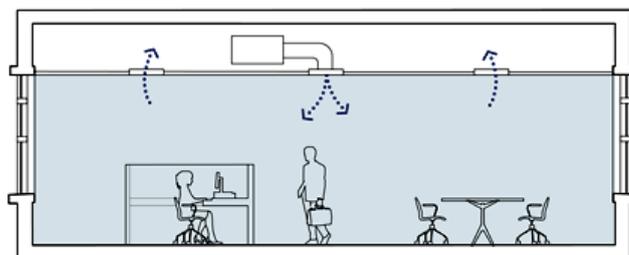


Figura 6 - Sistema alternado
Fonte: CBE (2016)

2.4.2 Vantagens e desvantagens

Segundo Brager, Ring e Powell (2000), os edifícios de modo misto oferecem três principais vantagens em relação aos edifícios somente com o ar condicionado, sendo elas:

- 1) Reduzem o consumo dos sistemas mecânicos de climatização: um edifício de modo misto bem projetado e operado adequadamente pode reduzir ou até mesmo eliminar o uso dos sistemas mecânicos de resfriamento ao longo do ano, podendo reduzir o uso de energia elétrica do edifício comercial de 15 a 80%, dependendo das condições climáticas, tipo do edifício e capacidade de resfriamento do sistema mecânico. Além disso, ele está associado a reduzir impactos ambientais negativos, já que diminui consequentemente a emissão de poluentes.
- 2) Aumentam a satisfação dos usuários: edifícios com ventilação híbrida podem oferecer aos usuários um alto grau de controle sobre as condições locais térmicas e de ventilação, diminuindo os problemas relacionados à qualidade do ar e aumentando o conforto dos ocupantes.
- 3) Melhoram a resiliência dos edifícios: os edifícios híbridos podem ainda fornecer uma maior flexibilidade aos sistemas mecânicos de condicionamento artificial de ar, gerando uma maior adaptação às mudanças de uso do ambiente, reduzindo os custos do ciclo de vida e podendo aumentar a vida útil dos sistemas mecânicos.

Contudo existem alguns problemas que também podem surgir com a ventilação híbrida, ainda segundo os autores (BRAGER; RING; POWELL, 2000):

- 1) Potencial aumento de custo e/ou complexidade: alguns modelos de edifícios de modo misto possuem sistemas complexos de condicionamento artificial de ar e muitas vezes de ventilação natural, o que pode gerar um aumento de custo e complexidade no projeto do edifício.
- 2) Excesso no consumo de energia: quando o sistema de ventilação híbrida não é bem planejado, não havendo uma sintonia entre o sistema mecânico e o de ventilação natural, pode ocorrer um gasto de energia

elétrica maior, já que não haverá o condicionamento estável do ambiente.

- 3) Frustração de usuários: os usuários podem ficar frustrados devido a ruídos, oscilações de temperaturas e poluentes do ar exterior, se esses não forem controlados ou evitados.

Assim deve-se projetar um edifício de modo misto de forma consciente, a fim de se evitar os problemas mencionados, favorecendo suas principais vantagens.

2.4.3 Edifícios de modo misto e potencial de economia de energia

No cenário internacional a ventilação híbrida tem se tornado comum em edifícios comerciais segundo Gonçalves, Pereira e Cavaleri (in GONÇALVES; BODE, 2015) apresentando os melhores níveis de desempenho ambiental. Também é possível se observar a ampliação de pesquisas referentes a essa temática, elencando várias possibilidades de sistemas (SALCIDO; RAHEEM; ISSA, 2016).

Ji, Lomas e Cook (2009) avaliaram o desempenho térmico de um edifício de modo misto de baixo consumo de energia, na cidade de Hanchou, no sul da China. Essa edificação, de geometria não retangular, utilizava um sistema mecânico de climatização e mecanismos de ventilação natural através de dutos pelo forro (Figura 7). Através de um programa computacional de dinâmica dos fluidos (*CFD*), os autores afirmaram que a estratégia híbrida permitiu estender o uso da ventilação natural na região de clima subtropical (verão quente e inverno rigoroso), chegando a economizar até 35% da energia destinada para o resfriamento, além de melhorar a qualidade do ar interno em determinadas épocas do ano.

Em outro estudo, realizado em Montreal, no Canadá, investigou-se um edifício de modo misto real com um sistema também mais complexo (Figura 8). A ventilação híbrida nessa edificação era controlada a partir de um sistema automatizado que, ao verificar as condições externas, era responsável por abrir ou fechar aberturas mecânicas na fachada e integradas com o átrio. Nesse trabalho os autores verificaram que o edifício economiza 30% do resfriamento requerido no átrio e nos corredores, durante o período considerado mais crítico, de verão (KARAVA et al., 2012).

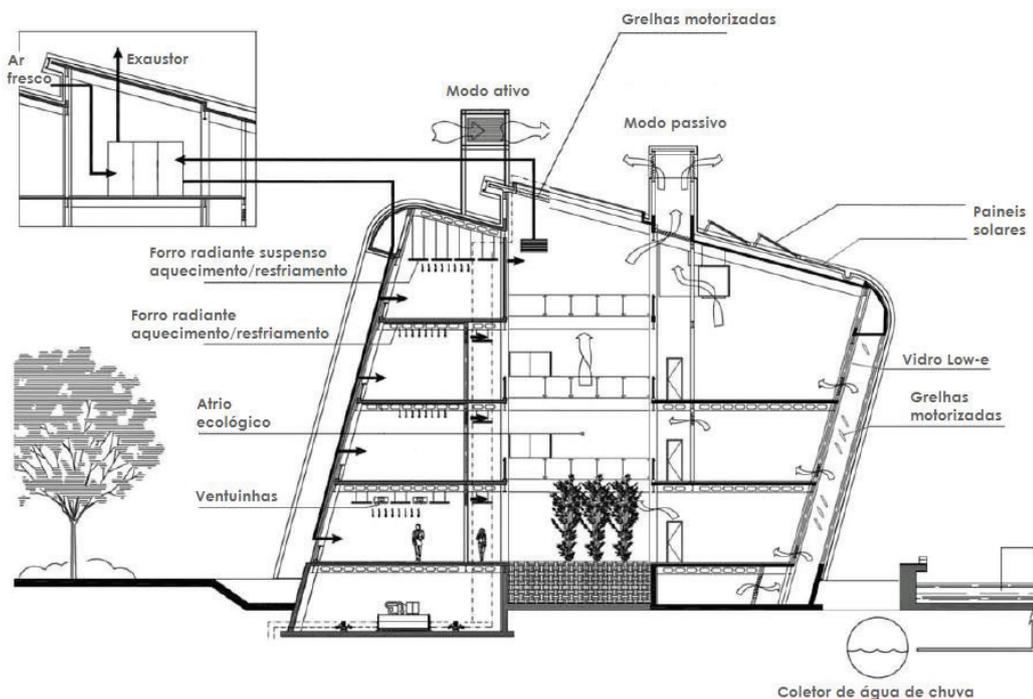


Figura 7 – Corte vertical de edifício de modo misto na China
 Fonte: Adaptada de Ji, Lomas e Cook (2009)



Figura 8 - Edifício de modo misto no Canadá
 Fonte: Karava et al. (2012)

Ezzeldin e Rees (2013), por outro lado, observaram o desempenho de várias estratégias de resfriamento para um modelo de edifício de escritório com diferentes níveis de ganho térmico interno, em quatro cidades representativas do clima árido (Alice Springs, Austrália; Manama, Bahrein; El Arish, Egito; Medina, Arábia Saudita). As estratégias de ventilação híbrida utilizavam diferentes sistemas mecânicos de ar condicionado e várias formas de se utilizar a ventilação natural, desde estratégias

simples até as mais sofisticadas (durante o período ocupado; ventilação noturna; resfriamento evaporativo direto e indireto; entre outros). Com a simulação no programa *EnergyPlus* dos diferentes modelos, foi possível observar que, apenas permitindo-se que o usuário tenha um comportamento mais ativo através do controle da abertura da janela, é possível economizar mais de 40% da energia anual consumida pelo sistema mecânico de volume variável (VAV), simplesmente por se alternar entre o sistema da ventilação natural e do mecânico através da abertura das janelas e desligamento do mesmo (EZZELDIN; REES, 2013).

Além da questão energética, como já foi mencionado, a ventilação híbrida proporciona um aumento do conforto dos usuários, devido à melhor qualidade do ar proporcionada no ambiente e Drake et al. (2010) observaram esse fato. Os autores compararam dois edifícios de modo misto existentes, um em Sydney e outro em Melbourne, na Austrália. O primeiro continha a ventilação híbrida nas salas de trabalho e o outro na área de descanso, respectivamente. Através de pesquisa de campo e entrevistas, nos dois ambientes verificou-se a preferência dos usuários pelo sistema híbrido do que em relação a um local com somente o ar condicionado, devido também à possibilidade de escolha do sistema utilizado.

Os trabalhos internacionais referentes a edifícios de modo misto demonstraram englobar abordagens diversas, fazendo referência tanto a estudos de caso de edifícios específicos, com sistemas complexos de ventilação natural, quanto à modelagem em programas computacionais. A partir deles é possível observar que o modo misto é uma união interessante entre os sistemas ativos e passivos, sendo uma alternativa aos edifícios somente com fachadas envidraçadas e climatização artificial e constante, proporcionando maior utilização da ventilação natural e maior economia de energia.

2.5 Integração da iluminação natural e da ventilação híbrida

Utilizar estratégias passivas em edifícios de escritórios torna-se importante tanto para a economia de energia como para o conforto dos usuários, sendo necessário observar os elementos da construção que mais influenciam nesses aspectos. Um dos elementos comumente existentes e que pode ser de simples uso na envoltória dos edifícios, favorecendo a utilização da iluminação e ventilação naturais, é a janela. Esse elemento sempre teve um relevante papel no processo de projeto arquitetônico, proporcionando o contato visual com a área externa, luz

natural para os ambientes, entrada de radiação solar e controle da ventilação natural, caracterizando padrões de uso tanto de energia como de conforto visual e térmico. Sendo assim, o seu dimensionamento, distribuição e orientação são fatores determinantes no projeto de edifícios ambientalmente conscientes (COTTA; VIEIRA in GONÇALVES; BODE, 2015; OCHOA et al., 2012; TIAN et al., 2010).

As características das janelas devem resultar de um processo cauteloso e ser parte do processo integral do projeto, considerando múltiplos aspectos concomitantemente. As contradições na escolha da área envidraçada podem ocorrer quando há a intenção de se unir vários critérios, como a diminuição do consumo de energia, mas ao mesmo tempo a busca pela maximização de aspectos visuais em ambientes climatizados artificialmente. Áreas envidraçadas maiores permitem que mais luz entre em um espaço, porém podem permitir um excessivo ganho solar durante o dia ou perda de calor durante a noite, devido à sua alta transmitância. Com isso, podem elevar o consumo de energia para resfriamento e aquecimento (GHISI; TINKER, 2005; OCHOA et al., 2012). A Figura 9 indica alguns fatores que podem influenciar e que devem ser levados em consideração na escolha da área envidraçada de uma edificação, destacando-se: a radiação solar; o sistema da fachada (proteções solares, materiais, tipo de vidro); o conforto visual dos usuários; a iluminação natural e artificial necessária; e o sistema de aquecimento e resfriamento.

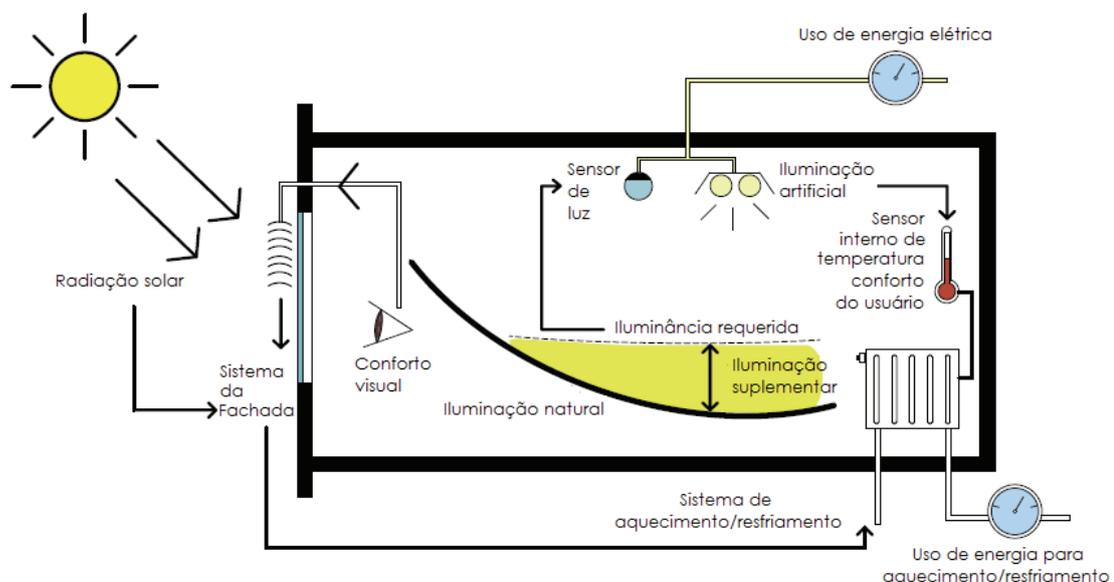


Figura 9 - Fatores que podem influenciar na escolha da área envidraçada
Fonte: Adaptada de Ochoa et al. (2012)

Otimizar um único componente da construção, avaliando-se apenas um parâmetro que influencia esse componente é encontrado frequentemente na literatura. Muitos trabalhos possuem como enfoque a avaliação da iluminação natural, visando diminuir o gasto de luz elétrica e/ou do ar condicionado e/ou promover o conforto ambiental do usuário (FASI; BUDAIWI, 2015; FRANZETTI; FRAISSE; ACHARD, 2004; GENTILE; LAIKE; DUBOIS, 2016; GHISI; TINKER, 2005; KRARTI; ERICKSON; HILLMAN, 2005; LI; WONG, 2007). Enquanto que outros estudos são direcionados para a ventilação natural, promovendo o maior conforto ambiental dos usuários com uma melhor qualidade do ar interno e/ou redução dos gastos, substituindo-se os sistemas mecânicos de resfriamento (BELLERI; LOLLINI; DUTTON, 2014; FIGUEIREDO, 2007; MARCONDES, 2010; RACKES; MELO; LAMBERTS, 2016). Contudo, dificilmente são encontradas pesquisas que integram essas duas estratégias passivas, devido ao aumento da complexidade e análise de resultados (OCHOA et al., 2012).

Com relação à integração da iluminação e ventilação naturais em edifícios de modo misto, destacam-se na literatura trabalhos referentes aos autores Rupp (2011), Rupp e Ghisi (2012, 2013) e Brugnera, Roriz e Chvatal (2016), desenvolvidos para climas brasileiros.

Rupp (2011) e Rupp e Ghisi (2012, 2013) estudaram diferentes modelos de salas de escritórios com ventilação híbrida e iluminação natural integrada a artificial, na cidade de Florianópolis. Os modelos analisados continham: três geometrias (1:1, 2:1 e 1:2)⁴; três tamanhos de salas por geometria (pequenas (P) até 12 m²; médias (M) até 76 m² e; grandes (G) até 473 m²); quatro orientações (norte, sul, leste e oeste) e; PAF variando de 10 a 100%. Com a simulação a partir do *EnergyPlus* e *Daysim*, os autores avaliaram faixas de PAF's (10 a 100%) que correspondessem ao menor consumo anual de energia elétrica para salas pequenas (P), médias (M) e grandes (G) para quatro estudos de caso. A Figura 10 mostra um exemplo do modelo geométrico simulado e as variações de PAF.

Os quatro estudos de caso investigados operavam com: somente sistema de iluminação artificial e ar condicionado (caso 1); iluminação natural com a artificial e ar condicionado (caso 2); somente a iluminação artificial e a ventilação híbrida (caso 3) e; iluminação natural com artificial e ventilação híbrida (caso 4). A partir dos resultados, comparando-se o caso 4 com o caso 1, os autores chegaram a alcançar uma redução entre 21,7 e 64,9% do consumo total de energia elétrica das

⁴ Geometria em relação à proporção da largura (L) pela profundidade (P), (L:P)

salas. Contudo, observou-se um mínimo consumo de energia elétrica total em muitos modelos, muito próximos (diferença menor que 5%), mesmo com diferentes PAF's. A Figura 11 exemplifica esse fenômeno com o caso 2, para uma sala pequena (P), geometria 2:1 e orientação sul. Verifica-se que, tanto para o PAF de 20% como para o de 40%, é semelhante o consumo de energia do ambiente.

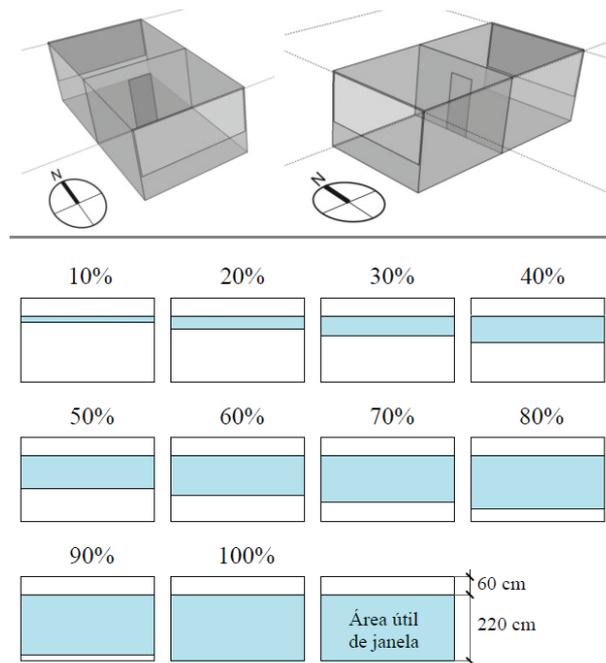


Figura 10 – Exemplo de modelo estudado e variações de PAF
 Fonte: Adaptada de Rupp e Ghisi (2012, 2013)

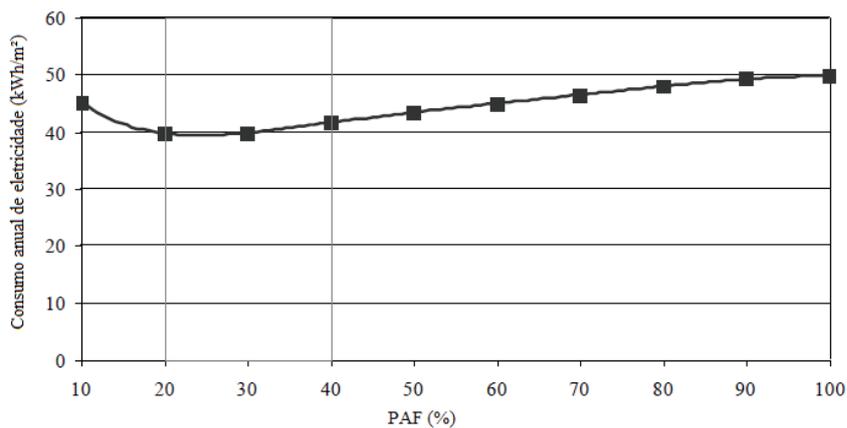


Figura 11 - Consumo anual de eletricidade como função da PAF para o caso 2, sala pequena (P), geometria 2:1 e orientação sul
 Fonte: Adaptada de Rupp e Ghisi (2012)

Devido a esse fato determinou-se uma faixa de valores e não apenas um único valor de PAF que poderiam ser utilizadas em salas de escritório na cidade de

Florianópolis. A Tabela 7 indica as faixas de PAF's encontradas pelos autores para cada caso, correspondentes ao menor consumo energético do ambiente.

Observa-se que no caso 4 os maiores valores de PAF's foram para: as salas grandes (G) e mais profundas (1:2) e; salas médias (M) e quadradas (1:1), mais largas do que profundas (2:1).

Tabela 7 - Percentual de área de abertura na fachada

Caso	Orientação	Faixas de PAF (%)								
		Geometria (1:2)			Geometria (1:1)			Geometria (2:1)		
		P	M	G	P	M	G	P	M	G
1	Norte	10	10-20	10-30	10	10-20	10-40	10-20	10-30	10-50
	Sul	10-20	10-30	10-70	10-20	10-40	10-100	10-30	10-60	10-100
	Leste	10	10-20	10-30	10	10-20	10-40	10-20	10-30	10-60
	Oeste	10	10-20	10-30	10	10-20	10-30	10-20	10-20	10-50
2	Norte	10-20	30-50	10-100	21	50-80	10-70	30-50	10-100	10-60
	Sul	20-40	40-90	40-100	20-50	70-100	10-100	20-40	70-100	10-100
	Leste	10-20	30-50	10-100	20-30	40-80	10-100	30-50	10-100	10-70
	Oeste	10-20	30-50	10-100	21	40-80	10-50	30-50	10-100	10-50
3	Norte	10-30	10-70	10-100	10-40	10-60	10	10-70	10-100	10
	Sul	10-40	10-70	10-100	10-40	10-70	10	10-60	10-100	30-100
	Leste	10-30	10-50	20-100	10-40	10-60	20-100	10-50	10-80	30-100
	Oeste	10-30	10-50	20-100	10-30	10-60	20-100	10-50	10-80	30-100
4	Norte	20-40	40-100	60-100	20-50	50-100	40-100	40-100	60-100	30-100
	Sul	20-40	40-100	50-100	30-60	70-100	40-100	30-60	70-100	40-100
	Leste	20-30	30-70	40-100	20-40	60-100	40-100	40-80	40-100	30-100
	Oeste	20-30	40-70	60-100	20-40	60-100	40-100	40-90	50-100	30-100

Fonte: Adaptado de Rupp e Ghisi (2012)

No relatório interno de Brugnera, Roriz e Chvatal (2016) elaborado a partir do trabalho de Brugnera (2014), verificou-se também o potencial de economia de energia, porém para uma saleta comercial com o uso da ventilação híbrida integrada com a iluminação natural em São Carlos. Os modelos dos autores continham uma sala de mesma dimensão (34 m²), de geometria próxima a 1:1,25 e PAF's de 30, 50 e 80%. Através dos dados obtidos da simulação computacional com o *EnergyPlus* e *Daysim*, comparou-se dois casos: com iluminação natural integrada com a artificial e ar condicionado (caso 1) e; com iluminação natural integrada com a artificial e ventilação híbrida (caso 2). Através dos resultados obtidos, além de se observar que, com a estratégia de ventilação híbrida, foi possível reduzir em 30% o consumo do ar condicionado e 26% do consumo da energia total anual, os

autores perceberam que existe uma alternância entre a retirada do calor interno pela ventilação natural e pelo ar condicionado nas simulações. A Figura 12 indica os ganhos e as perdas de calor que ocorrem no ambiente em um dia médio do ano, para o mesmo funcionando com o caso 1 (ACF) e com o caso 2 (AC+VN=VH) e ao se aumentar o PAF. No caso 1, conforme se aumenta a área envidraçada, o ganho de calor também aumenta e é retirado pelo ar condicionado que consome mais energia. Enquanto que no caso 2, com o aumento da área envidraçada e conseqüentemente da abertura, aumenta-se também a capacidade de ventilar, o que reduz o uso do ar condicionado e o consumo de energia.

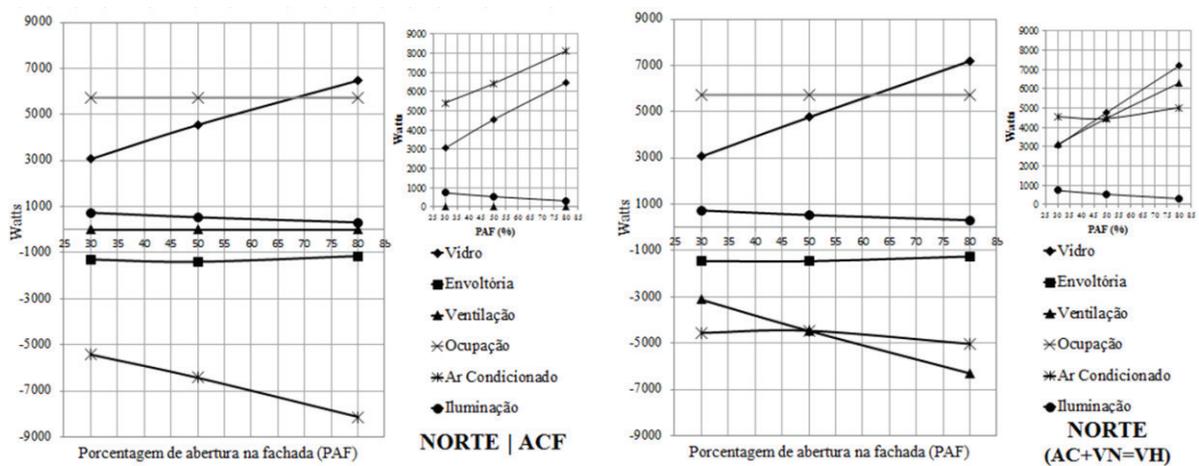


Figura 12 - Fluxos de calor de um dia médio anual de acordo com cada PAF e caso (1 e 2)
 Fonte: Brugnera, Roriz e Chavatal (2016)

A partir desse trabalho, observa-se que é atingido um determinado limite de PAF, onde não há mais remoção do calor interno do ambiente, fato também que justifica o motivo de que as pesquisas com ventilação híbrida, como a de Rupp (2011) e Rupp e Ghisi (2012, 2013) apresentarem uma larga faixa de PAF para um mesmo consumo energético. Ou seja, no caso mais extremo, das pesquisas de Rupp e Ghisi, com os PAF's de 30 e 100%, a redução do consumo do ar condicionado para a PAF de 30% é praticamente a mesma que para o PAF de 100%, devido a remoção do calor interno ser, praticamente, equivalente. Evidencia-se a necessidade de apurar mais esses resultados, verificando se existem PAF's que proporcionem a retirada do calor excessivo, ou mesmo diminuir essa faixa de valores, a partir da avaliação de outros critérios, com o auxílio da simulação computacional.

2.6 Programas de simulação computacional

Os programas de simulação podem ser utilizados para se obter o desempenho térmico, energético e/ou visual de uma edificação, auxiliando os projetistas a prever as influências no conforto ambiental e no consumo de energia elétrica, proporcionando decisões de projeto que considerem os impactos do clima na construção (RAMOS; GHISI, 2010; ROMERO, 2007). A Tabela 8 indica as características disponíveis para se avaliar a ventilação híbrida e iluminação natural nos principais programas de simulação computacional.

Tabela 8 – Módulos para simulação da ventilação híbrida e da iluminação natural

Características	ESP-r	DOE-2	TRNSYS	EnergyPlus
Cálculos do ganho solar e iluminação natural respondem por inter-reflexões a partir de componentes externos da construção	x		x	x
Visão interna dos fatores de radiação	x			x
Ventilação Natural	x		x	x
Infiltração em uma zona	x	x	x	x
Fluxo de ar multizona	x		x	x
Calculo automático dos coeficientes de pressão do vento				x*
Controle da abertura da janela baseada nas condições externas ou da zona	x		x	x
Deslocamento da ventilação	x		x	x
Sistema ideal de ar condicionado	x		x	x
Sistema de ar condicionado configurado pelo usuário	x		x	x
Cargas simples de energia e demanda	x	x	x	x
Tarifas de energia complexas		x	x**	x

Legenda: x – disponível; x* - parcialmente implementada; x** - requer o domínio avançado do usuário.

Fonte: Adaptada de Crawley et al. (2008)

A partir dessa tabela, é possível observar que, dentre os quatro programas analisados (*ESP-r*, *DOE-2*, *TRNSYS* e *EnergyPlus*), o que contém uma maior quantidade de características disponíveis para a avaliação da ventilação, iluminação natural e do ar condicionado é o *EnergyPlus*. Este é um programa desenvolvido pelo Departamento de Energia Norte-Americano – EERE, capaz de simular o comportamento térmico e/ou energético da construção através da especificação da geometria, dos materiais do envelope, dos padrões de uso e ocupação e das cargas térmicas existentes (EERE, 2014). Os módulos de simulação dos sistemas construtivos possuem intervalos de tempo variável, permitem calcular o sistema de

aquecimento e resfriamento e observar o fluxo de ar entre as zonas, gerando a resposta do sistema elétrico e da construção (CRAWLEY et al., 2008; EERE, 2014; MUSTAFARAJ et al., 2014; ROMERO, 2007). O *EnergyPlus* é um programa gratuito validado pela ANSI/ASHRAE Standard 140 (2004), que funciona em qualquer sistema operacional, além de ser considerado o mais utilizado na otimização de edifícios (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

A partir da Tabela 8 destaca-se que o programa contém módulos tanto para o cálculo da ventilação natural como para a iluminação natural. O módulo mais preciso presente nele para a ventilação é o denominado *AirflowNetwork*, capaz de simular o fluxo de ar, forçado ou natural, entre o interior do ambiente e o exterior através de frestas e aberturas. Uma de suas restrições é se utilizar um modelo que possua geometria retangular, devido ao fato de serem as geometrias registradas no banco de dados do programa (EERE, 2014).

Contudo, em relação aos módulos de iluminação natural, seus métodos de cálculo superestimam a quantidade de luz natural no interior do ambiente, o que influencia diretamente no consumo de energia elétrica (DIDONÉ; PEREIRA, 2010; GHISI; TINKER; IBRAHIM, 2005; JAKUBIEC; REINHART, 2011; RAMOS; GHISI, 2010). Existem diversas ferramentas para a simulação da iluminação natural, separadas de acordo com seus algoritmos de cálculo e divididas em relação ao método que utilizam. Os principais métodos são conhecidos como Radiosidade, Fluxo Dividido e Raio Traçado (KOTA; HARBERL, 2009). O programa *EnergyPlus* adota os métodos mais simplificados, o de Radiosidade e do Fluxo Dividido, que possuem limitações na precisão dos dados, diferentemente do método do Raio Traçado, presente no algoritmo *RADIANCE*, que apesar de ser mais complexo, é mais preciso e o mais utilizado mundialmente (REINHART; FITZ, 2006; YUN; KIM, 2013).

Um dos programas que se utiliza do algoritmo *RADIANCE* é o *DIVA-for-Rhino*, um plug-in recente, inserido no programa de modelagem *Rhinoceros3D Nurb* (SOLEMMA, 2014). Com ele é possível realizar uma análise da iluminação natural definindo-se as propriedades das superfícies e a malha de pontos onde serão medidas as iluminâncias em um determinado modelo no período de um ano. Além disso, esse *plug-in* integra o programa *Daysim*, apresentando um gradiente de iluminâncias de acordo com cada ponto da malha no plano de trabalho, permitindo definir o comportamento dos usuários. Os arquivos gerados indicam os períodos em que a iluminação artificial deve complementar a natural e podem ser

importados para o programa *EnergyPlus* (JAKUBIEC; REINHART, 2011). Desta forma, é realizada a complementação da simulação do *EnergyPlus*, obtendo dados mais precisos de iluminação.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo descreve-se o processo metodológico da pesquisa. O método do trabalho se baseou no proposto por Rupp e Ghisi (2012) e Ghisi e Thinker (2005), que estabelece o dimensionamento da área de abertura na fachada levando em consideração como critério o menor consumo energético. Este trabalho analisou saletas comerciais com ventilação híbrida e iluminação natural integrada à artificial para a cidade de São Paulo, utilizando como instrumento de avaliação a simulação computacional. Os programas principais adotados foram o *EnergyPlus* (EERE, 2014), para a simulação do desempenho termo-energético, e o *plug-in DIVA-for-Rhino* (SOLEMMA, 2014), para a simulação da iluminação natural. Para a modelagem e rodagem das simulações paramétricas foi utilizado como programa complementar o *OpenStudio* (OPENSTUDIO, 2014), conforme mostra a Figura 13.



Figura 13 - Programas utilizados para a simulação computacional

Para realizar as simulações e a análise dos resultados foi necessário seguir uma série de etapas. Primeiramente definiram-se características preliminares a serem utilizadas (3.1 Definições Preliminares), como as geometrias das saletas comerciais (cinco modelos com mesma área de piso e diferentes proporções, 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1), a localização geográfica das mesmas (São Paulo) e as variações principais pertinentes à pesquisa (orientação solar da área de abertura na fachada para norte, sul, leste e oeste e percentual de área de abertura na fachada, PAF's de 10, 40, 70 e 100%). Essas primeiras definições foram utilizadas tanto na modelagem da iluminação natural, no *DIVA-for-Rhino*, como na modelagem de arquivos gerais, no *EnergyPlus* e *OpenStudio*.

Na modelagem da iluminação natural no *DIVA-for-Rhino* (3.2 Modelagem da iluminação natural), a iluminação artificial foi considerada dimerizável e eficiente. As lâmpadas são acionadas, de forma individual, quando não se atingem, nas

superfícies de trabalho, a iluminação mínima necessária para escritórios com a iluminação natural. Desta forma, a carga térmica da iluminação artificial é pequena, variando de acordo com a quantidade de luz natural no ambiente. Para isso, foram unidos outros parâmetros às características preliminares, como a refletância das superfícies e sensores distribuídos no ambiente. Como dado de saída foi possível obter o padrão de funcionamento da iluminação artificial, com o seu consumo reduzido devido à utilização da luz do dia e índices de iluminâncias com o critério UDI, mostrando os locais onde há iluminação natural insuficiente, útil e excessiva.

Para a modelagem dos arquivos gerais no *EnergyPlus* e *OpenStudio* (3.3 Modelagem dos arquivos gerais), utilizou-se as características preliminares juntamente com outros parâmetros, como os componentes construtivos e ganhos internos do ambiente. O processo de simulação paramétrica foi utilizado para realizar as variações principais pertinentes da pesquisa (orientações e PAF's) com o programa complementar *OpenStudio* (3.4 Modelagem paramétrica). A modelagem da ventilação híbrida (3.7 Modelagem da ventilação híbrida) foi realizada a partir de um arquivo contendo itens necessários e básicos para uma simulação com grupos de ventilação natural, como o *Airflow Network* (3.5 Modelagem da ventilação natural) e ar condicionado, como o *Ideal Loads Air System* (3.6 Modelagem do ar condicionado). Enquanto que, para a modelagem do ar condicionado elaborou-se um arquivo com os grupos necessários para a simulação e somente o grupo do ar condicionado.

O processo de integração (3.8 Integração das simulações) foi realizado a partir dos arquivos gerais, com as variações principais dos modelos, unidos com os arquivos com ventilação híbrida, ar condicionado e iluminação artificial complementada pela natural. Por fim, escolheram-se apenas alguns modelos de saletas comerciais para verificar a influência da alteração de outros parâmetros (3.9 Variações extras), sendo alguns arquitetônicos (área de abertura efetiva do vão da janela e PAF's) e outros uso (carga interna dos equipamentos e temperatura de controle do ar condicionado). A Figura 14 representa um diagrama básico dos itens principais e da sequência metodológica utilizada, para um melhor acompanhamento do texto.

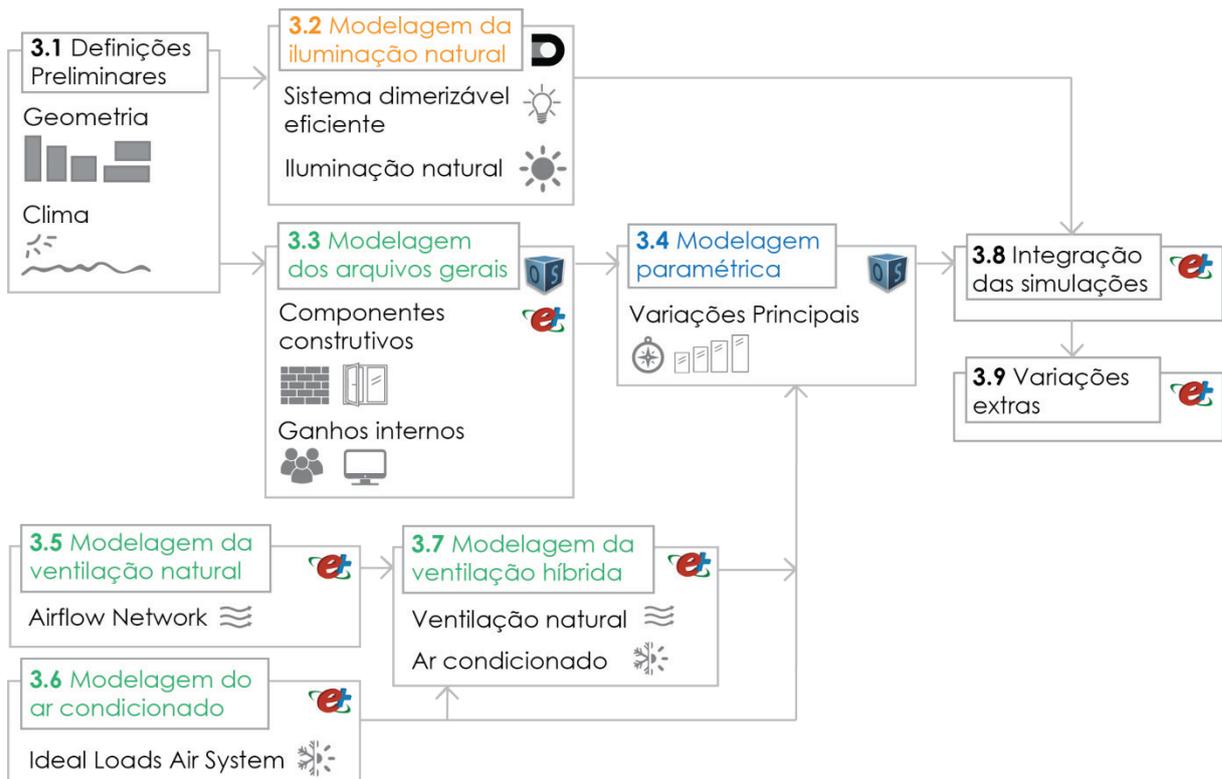


Figura 14 - Diagrama do processo metodológico

3.1 Definições Preliminares

Nesse capítulo são apresentadas as definições gerais dos modelos, utilizadas para as etapas de simulação.

3.1.1 Geometrias

O objeto de estudo selecionado para o trabalho foram os edifícios de escritório de saletas comerciais, devido ao fato de que esse tipo de ambiente proporciona maior uso da iluminação e da ventilação híbrida, além de fornecer maior conforto e satisfação dos usuários (BATTLE, 2003; MENDLER; ODELL; LAZARUS, 2006). Para definir a geometria dos modelos realizou-se um levantamento de dados na base da empresa Buildings (2016), elencando características de 55 edifícios de escritório com saletas comerciais, localizados na cidade de São Paulo (Apêndice A). As informações coletadas nesse estudo em relação à edificação foram: região de São Paulo onde se localiza o edifício; nome do edifício; ano de finalização da construção; quantidade de pavimentos; área total da edificação; área por andar (m²); área de piso das saletas comerciais (m²); pé direito de cada pavimento (m) e; tipo de condicionamento artificial de ar.

Alguns edifícios não possuíam as informações do ano em que foram finalizados e entregues para uso e o pé direito do pavimento, porém foram considerados em relação aos outros parâmetros. Com esse levantamento verificou-se que as edificações possuíam em média 15 pavimentos, com as saletas comerciais contando com o ar condicionado do tipo *Split* em sua maioria. A área de piso das salas comerciais continham no mínimo 13 m² e no máximo 67 m², sendo a média de 36 m², com um pé direito de 2,7 m na maioria das edificações. A Figura 15 exemplifica um tipo de edificação, contendo algumas das características mais observadas.

Edifício com saletas comerciais	
	
Características observadas	
nº catalogado	44
Edifício	Spot Offices Penha
Região de São Paulo	Outras
Ano	2014
Número de pavimentos	12
Área por andar (m ²)	337,92
	631,77
Área total do edifício (m ²)	6880,00
Área da saletas comerciais (m ²)	30
	34
Pé-direito (m)	2,70
Tipo do ar condicionado	Split System

Figura 15 - Características de um edifício com saletas comerciais "médias" na cidade de São Paulo

Fonte: Elaborada a partir de Buildings (2016)

Portanto, a partir dos padrões de saletas comerciais de edifícios de escritórios observadas na revisão de literatura e na catalogação de edifícios da empresa Buildings (2016), definiu-se cinco modelos de saletas comerciais que irão compor os módulos de simulação. Esses modelos contam com pé-direito útil de 2,7 m e área de piso próxima a 36 m², respeitando-se as relações de proporção por geometria

definidas na Figura 16. Suas características de geometria mais específicas e classificação nesse trabalho estão apresentadas na Tabela 9. A escolha de cinco proporções (sala quadrada 1:1, salas profundas 1:2 e 1:3 e salas largas 2:1 e 3:1) permitiu explorar todas as combinações e possibilidades dentro de uma mesma área limite de projeto. Com isso é possível observar a influência da geometria em ambientes com ventilação híbrida e a integração da iluminação natural com a artificial.

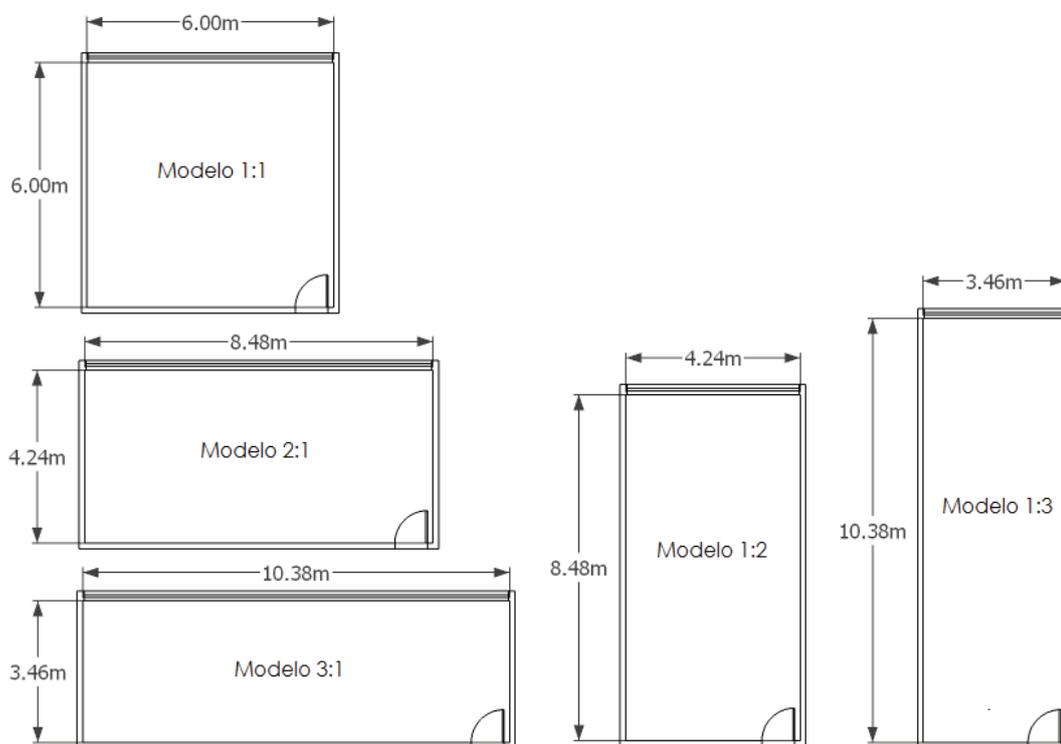


Figura 16 - Geometria dos modelos de saletas comerciais

Tabela 9 - Características dos modelos de saletas comerciais escolhidas para a simulação

Nomenclatura	Dimensão	Área total de piso	Pé direito útil
Modelo 1:1	6 m x 6 m	36 m ²	2,7 m
Modelo 1:2	4,24 m x 8,48 m	35,96 m ²	2,7 m
Modelo 1:3	3,46 m x 10,38 m	35,92 m ²	2,7 m
Modelo 2:1	8,48 m x 4,24 m	35,96 m ²	2,7 m
Modelo 3:1	10,38 m x 3,46 m	35,92 m ²	2,7 m

3.1.2 Clima

Escolheu-se para a localização dos edifícios de escritórios com saletas comerciais a cidade de São Paulo, devido ao fato de essa cidade concentrar uma

grande quantidade dessa tipologia de edificação e ter uma grande representação não só no país, como também internacional.

A cidade de São Paulo (latitude de $-23^{\circ} 85'$, longitude de $-46^{\circ} 64'$ e altitude de 792 metros) está localizada na região sudeste brasileira e situada na zona bioclimática 3, de acordo com a norma brasileira NBR 15220-3 (ABNT, 2005a). Seu clima é o tropical de altitude (Cwa), segundo a classificação climática de Koeppen, caracterizado por ter duas estações bem definidas, inverno seco e verão quente e chuvoso (CEPAGRI, 2016). As médias das temperaturas na cidade ficam em torno de 20 e 21°C durante 50% do ano, com média anual de umidade relativa de 71%, velocidade dos ventos de 1,7 m/s e direção predominante à 110°, leste e sudeste, conforme indicam a Tabela 10 e Figura 17.

Para as simulações utilizou-se o arquivo climático (.epw) da cidade de São Paulo elaborado por Roriz (2012) e atualizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) juntamente com Dru Crawley e Linda Lawrie (2015).

Tabela 10 - Características das médias mensais ao longo do ano para São Paulo

Mês	Temperatura do Bulbo Seco - TBS (°C)	Umidade Relativa (%)	Velocidade dos ventos (m/s)	Direção dos ventos (°)
Janeiro	21	75	2	110
Fevereiro	22	74	2	100
Março	21	72	2	140
Abril	20	72	1	140
Mai	17	69	2	130
Junho	16	74	1	90
Julho	17	62	1	80
Agosto	18	69	1	60
Setembro	17	71	2	130
Outubro	20	73	2	80
Novembro	20	73	2	110
Dezembro	20	72	2	150
Anual	19,08	71,33	1,67	110

Fonte: Elaborada a partir de UCLA, 2015 com arquivo climático (.epw)

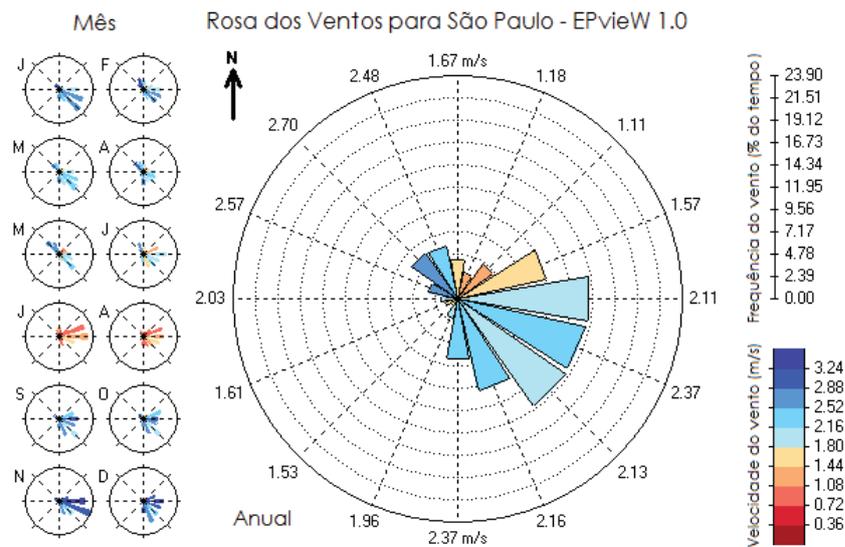


Figura 17 - Rosa dos ventos para a cidade de São Paulo
 Fonte: Adaptado de Roriz e Roriz (2015), gerado com arquivo climático (.epw)

3.1.3 Parâmetros variáveis

Depois de definidos os cinco modelos de saletas comerciais, definiram-se os parâmetros principais que foram variáveis em todos os modelos. Para verificar a influência da ventilação natural, do ar condicionado e da iluminação natural no ambiente verificou-se através da literatura que a dimensão da janela e sua respectiva orientação solar podem ter uma grande influência nessas estratégias de maneira conjunta (COTTA; VIEIRA in GONÇALVES; BODE, 2015; OCHOA et al., 2012; TIAN et al., 2010). Desta forma, como variações principais para as simulações utilizou-se:

1. Percentual de área de abertura na fachada (PAF): quatro valores de PAF's nas saletas comerciais, de 10, 40, 70 e 100%. A escolha desde uma área envidraçada mínima até uma área envidraçada máxima, considerando o espaço útil da fachada, apesar de muitas vezes não representar a realidade permite uma análise mais completa, fornecendo informações mais detalhadas para auxiliar nas tomadas de decisões de projeto.
2. Orientação: quatro orientações solares da área de abertura na fachada das salas comerciais, sendo norte, sul, leste e oeste. Com isso abrangeu-se os quatro pontos cardeais.

3.2 Modelagem da iluminação natural

Para a simulação da iluminação natural é necessário modelar a geometria no *Rhinoceros 3D Nurbs* e definir uma malha de pontos, onde estarão localizados os sensores para o acionamento individual das lâmpadas. O *plug-in DIVA-for-Rhino*, versão 3.0 só aceita uma única zona térmica⁵, portanto foi modelada uma saleta comercial por simulação. A Figura 18 indica um exemplo de modelagem de uma geometria de saleta comercial. Nela está apresentada a área envidraçada (superfície azul claro), a distribuição dos pontos da malha e uma escala de cor de pontos com elevada iluminação (laranja - próximos à janela) e com baixa iluminação (azul - no fundo da sala).

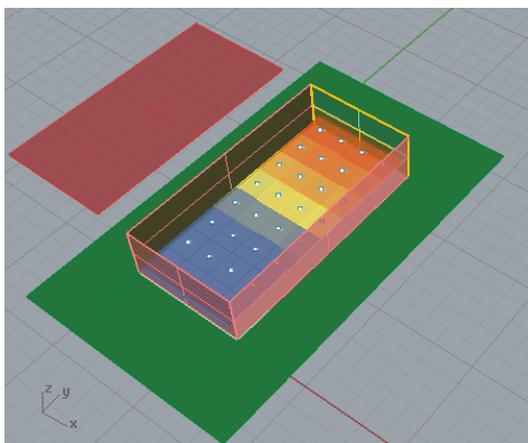


Figura 18 – Exemplo da modelagem de geometria da sala comercial

O processo de simulação é realizado a partir de quatro etapas, com a barra de ferramentas do *plug-in*:

- 1) *Location*: Seleção do arquivo climático. Foi inserido o arquivo climático (.epw) da cidade de São Paulo (ver 3.1.2. Clima)
- 2) *Nodes*: Modelagem da malha de pontos no ambiente a ser analisado. Os pontos foram posicionados na altura do plano de trabalho, a 0,75 m do piso, seguindo a norma NBR 15215-4 (ABNT, 2004). A distância entre eles e a quantidade mínima de pontos foi calculada a partir da mesma norma (ABNT, 2004). Para os Modelos 1:2, 1:3, 3:1 e 2:1 foram utilizados 18 pontos, e para o Modelo 1:1 foram utilizados 16. A quantidade de pontos se difere com o Modelo 1:1 devido à sua geometria.

⁵ Zona térmica: definida como um ambiente onde o volume de ar tem uma temperatura uniforme. Pode ser delimitada por superfícies que compõem o ambiente ou outros fatores, dependendo do caso (EERE, 2014).

- 3) *Materials*: Definição das características de refletância do material opaco e transmitância da janela das superfícies do modelo e também do tipo de iluminação artificial empregada (Tabela 11).
- 4) *Metrics*: Escolha do tipo de simulação (*Climate Based* - baseada no arquivo climático, simula as condições de sol e céu durante o ano todo) e dos critérios dos dados de saída que se deseja analisar (Tabela 11).

Tabela 11 - Dados de entrada do *plug-in DIVA-for-Rhino*

Parâmetros do <i>DIVA-for-Rhino</i>	Descrição	Valores	Importância/Referência	
<i>Materials</i>	Laje	80%	Jakubiec, Reinhart (2011)	
	Terreno externo	20%		
	Piso interno	20%		
	Parede interna	50%		
	Parede externa	30%		
	Janela	Transmitância visível	88%	Vidro simples
	<i>Lighting Group -> Select Nodes</i>	Localização dos sensores de iluminância para o cálculo da iluminação artificial	Todos os pontos da malha	Aproveitamento da iluminação natural no ambiente como um todo
	<i>Operation</i>	Operação do sistema de iluminação artificial, com o acionamento individual em cada sensor	"Dimming w. Occupancy Off Sensor"	Sistema mais eficiente (Controle automático dimerizável com sensor de desligamentos quando não há ocupantes).
<i>Lighting Power (W)</i>	Potência das lâmpadas	Área da sala x 9,7	Segundo o RTQ-C, eficiência Nível A, é utilizado 9,7 W/m ²	
<i>Lighting Setpoint (lx)</i>	Iluminância mínima para a iluminação artificial em escritório	500	NBR ISO CIE 8995-1 Iluminação de ambientes de trabalho (ABNT, 2013).	
<i>Metrics</i>	<i>Occupancy Schedule</i>	Horário de ocupação	Durante a semana: 8-18h. Final de semana: 0 (sem considerar feriados)	
	<i>Target Illuminance</i>	Iluminância mínima selecionada para a simulação	500	NBR ISO CIE 8995-1 Iluminação de ambientes de trabalho (ABNT, 2013).
	<i>Units</i>	Unidade da iluminância	lx	Unidade básica utilizada

Os parâmetros do algoritmo *RADIANCE* foram modificados para se obter resultados mais precisos. Para a simulação da iluminação natural é recomendado utilizar valores "muito apurados", segundo o manual *Radiance Tutorials* (JACOBS, 2012). Definiu-se, portanto: -ab (ambient bounces) = 5; -aa (ambient accuracy) =

0.08 ; -ar (ambient resolution) = 512; -ad (ambient divisions) = 2048 e; -as (ambient super-samples) = 512.

Foram realizadas 80 simulações para as cinco saletas comerciais (Modelo 1:1, Modelo 1:2, Modelo 1:3, Modelo 2:1, Modelo 3:1), com quatro PAF's (10, 40, 70 e 100%) e quatro orientações (norte, sul, leste, oeste). Os resultados dessas simulações foram utilizados para se inserir o padrão de funcionamento da iluminação artificial no *EnergyPlus* (arquivo texto .csv) e também para se analisar o ambiente em relação ao aproveitamento da iluminação natural com o critério UDI. É importante destacar que a simulação da iluminação natural não tem interferência no modo de operação da saleta comercial (ar condicionado constante ou ventilação híbrida)

3.3 Modelagem dos arquivos gerais

Para realizar as análises no *EnergyPlus* e *OpenStudio* optou-se pela criação de um módulo do edifício, considerado como representativo, pois segundo Reinhart e Wienold (2011) e Ghisi (2002), a utilização do mesmo representa melhor a realidade do que a simulação de um edifício completo. A Figura 19 indica os modelos utilizados por Reinhart e Wienold (2011) e Ghisi (2002), e os modelos utilizados para simulação da ventilação híbrida de Rupp (2011) e Brugnera (2014).

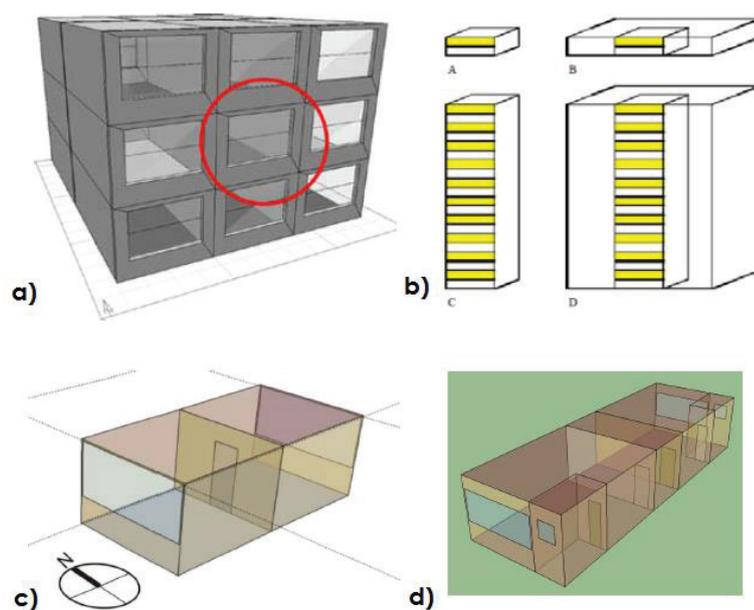


Figura 19 - Modelos adotados por (a) Reinhart e Wienold (2011); (b) Ghisi (2002); (c) Rupp (2011) e; (d) Brugnera (2014)

Com isso, cada módulo foi composto por duas saletas comerciais de mesma dimensão com um corredor entre elas, ou seja, três zonas térmicas. Apesar de haver o corredor, este não foi incluído nas análises, estando presente por questões estruturais do ambiente. O módulo escolhido da edificação possui essa estrutura devido às questões ligadas ao processo de simulação do *EnergyPlus*, como, o fato do módulo de ventilação natural *AirflowNetwork* ser direcionado para ambientes multizonas e também para diminuir o número de simulações, já que duas orientações podem ser analisadas com uma mesma simulação (Norte-Sul e Leste-Oeste).

O processo de criação de geometria para o programa *EnergyPlus* foi realizado através do *plug-in* do *OpenStudio* para o programa *SketchUp* (2015) promovendo uma interface entre os dois programas (EERE, 2014). A Figura 20 apresenta a estrutura de um módulo exemplo utilizado nas simulações.

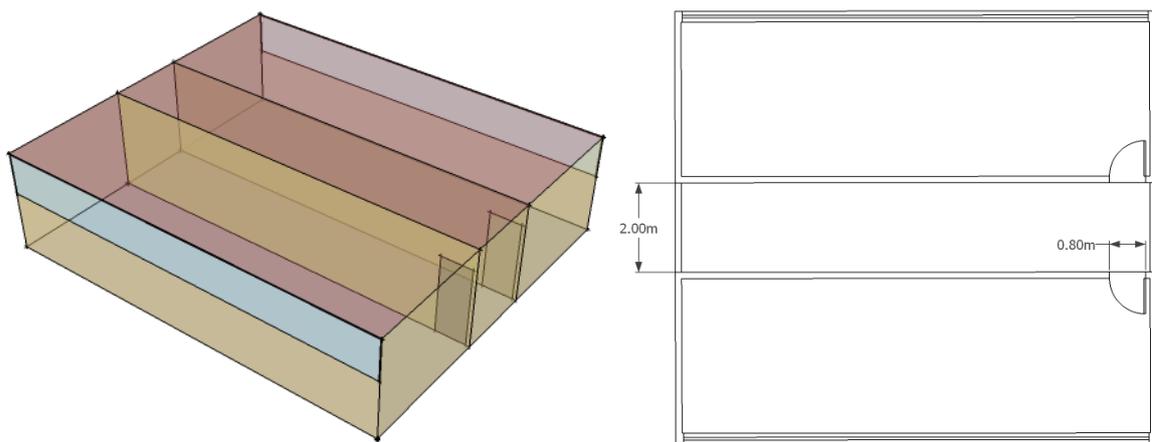


Figura 20 - Geometria exemplo de um módulo de simulação

A partir da criação do módulo, inseriu-se os grupos gerais para a realização de uma simulação básica com o *EnergyPlus*. A modelagem da simulação computacional pode variar muito de acordo com a experiência e conhecimento do simulador, de forma que nessa etapa da pesquisa os grupos inseridos e que constam no programa podem ser observados na Tabela 12. Esses arquivos gerais foram utilizados para realizar as variações pertinentes à pesquisa (modelo_base para modelo_orientação_PAF).

Tabela 12 - Estrutura com os grupos básicos de um arquivo geral

Versão do <i>EnergyPlus</i>	8.2
Controle da Simulação	Rodar a simulação para o arquivo climático
Edifício	Eixo norte: Variável (0 e 90)
	Terreno: Cidade
	Distribuição solar: <i>FullInteriorandExterior</i>
Algoritmo de conversão de superfície	Interno e Externo: TARP
Simulação por hora (<i>Timestep</i>)	6
Localização	Características de São Paulo
Período simulado	Todos os dias do ano (feriados considerados como dias normais)
Padrões de Uso (<i>Schedules</i>)	Padrões de comportamento durante a semana e fim de semana para pessoas e equipamentos (ver item 3.3.2 Ganhos internos)
Materiais e Construção	Componentes construtivos das superfícies (ver item 3.3.1 Componentes construtivos)
Regras Globais de Geometria	Padrão do programa (<i>default</i>)
Zona	Zonas térmicas do ambiente e suas dimensões
	Z1: Primeira saleta comercial (orientação pode variar Norte-Leste)
	Z2: Corredor
	Z3: Segunda saleta comercial (orientação pode variar Sul-Oeste)
Detalhes das superfícies	Detalhes das paredes internas, externas, forro, piso, janelas e portas (ver item 3.3.1 Componentes Construtivos) e sua relação com o ambiente interno e externo.
	Paredes internas, piso e forro foram considerados adiabáticos.
Ganhos internos (Pessoa, Equipamento Elétrico)	Ganhos internos que representam os equipamentos e as pessoas no ambiente (ver item 3.3.2 Ganhos internos)
Dados de saída (<i>Output</i>)	Escolha de critérios para gerar os dados de saída necessários para as análises. Pediram-se como dados de saídas 25 itens contemplando: a Temperatura do ar externa, interna; renovações de ar por hora dos ambientes; entre outros (APÊNDICE B).

3.3.1 Componentes construtivos

Os componentes construtivos das saletas comerciais são apresentados na Tabela 13. As definições de propriedades físicas foram definidas a partir da NBR 15220-2 (ABNT, 2005b). Os parâmetros em relação aos elementos construtivos que não foram citados na tabela foram considerados como o padrão do próprio programa *EnergyPlus* (default).

Tabela 13 - Características de construção

Parâmetros			Variáveis	
Construção	Vidro	Cor	incolor	
		Espessura	6 mm	
		Transmitância à radiação solar	0,81	
		PAF (%)	Variável	
	Parede Interna: Argamassa (2,5 cm) + Bloco de concreto furado (9 cm) + Argamassa (2,5 cm)	Transmitância Térmica		2,27 W/m ² K
		Absortância	Solar	0,1 ⁶
	Parede Externa: Argamassa exterior (2,5 cm) + Bloco cerâmico furado (19 cm) + Argamassa interior (2,5 cm)	Transmitância Térmica		2,62 W/m ² K
		Absortância	Solar	0,1
	Cobertura: Laje de concreto (8 cm)	Transmitância Térmica		3,31 W/m ² K
		Absortância	Solar	0,1
Piso: Brita (3 cm) + Concreto (5 cm) + Argamassa (2,5 cm) + Piso cerâmico (0,4 cm)	Transmitância Térmica		3,08 W/m ² K	
Porta: Madeira	Espessura		3,5 cm	

3.3.2 Ganhos internos

A ocupação do ambiente de escritório e a influência dos usuários em questões térmicas juntamente com o padrão de uso dos equipamentos podem ser observados na Tabela 14.

⁶ Tinta acrílica fosca – Branco Neve (DORNELLES, 2008)

Tabela 14 - Ganhos internos e padrão de uso

Parâmetros relacionados aos Ganhos Internos			Referência
Usuários	Ocupação (m ² /pessoa)	7	NBR 16401-3 (2008a)
			NBR 9077 (2001)
			Código de Obras e Edificações no município de São Paulo (BRASIL, 1992)
	Taxa metabólica (W/m ²)	65	Realizando a atividade de digitar em escritórios (EERE, 2014)
	Período ocupado (horas)	8-18	Período de trabalho mais utilizado visto na revisão de literatura
Equipamentos	Densidade (W/m ²)	10,7	Densidade média para escritórios. Ambiente com computador, monitor, impressora e fax (ASHRAE Fundamentals Handbook, 2005 apud NBR 16401-1, 2008b)
	Padrão de uso (horas)	8-18	Período de trabalho mais utilizado visto na revisão de literatura
Iluminação	Densidade (W/m ²)	9,7	Nível A do RTQ-C (INMETRO, 2014)
	Padrão de uso (horas)	Dimerizável	Simulação do <i>DIVA-for-Rino</i>

3.4 Modelagem paramétrica

Através do programa *Parametric Analysis Tool (PAT)* do *OpenStudio*, criaram-se as variações pertinentes para a pesquisa. Esse processo é realizado através do banco de dados que podem ser importados pelo programa. Importou-se dois grupos para a pesquisa denominados, *Set Window to Wall Ratio by Facade Group*, que cria variações de área de abertura da fachada em relação a cada fachada e *Rotate Building*, que realiza a mudança de orientação do módulo. É necessário definir grupos de novas medidas (*New Measure Group*) para cada fachada, com as variações de PAF's, a partir da altura do peitoril. E na opção *Design Alternatives*, geram-se as opções dos novos modelos, modificados a partir do caso base.

Infelizmente o PAT ainda não possui grupos em seu banco de dados com componentes mais elaborados, que estão presentes no *EnergyPlus*, como o *Airflow Network*, que é utilizado nessa pesquisa para a simulação da ventilação natural. Sendo assim, através do PAT foram realizadas as variações dos parâmetros dos arquivos gerais (PAF e orientação, ver item 3.2.3 Parâmetros variáveis), proporcionando uma maior agilidade no trabalho, criando um arquivo para cada modelo (arquivos gerais, classificados como modelos_base em arquivos .idf classificados como modelo_orientação_PAF). Apesar de facilitar o processo de modelagem, os arquivos gerados pelo PAT do *OpenStudio*, criam grupos que não

são necessários para esta simulação, sendo necessário revisar os arquivos deixando os grupos relevantes à pesquisa já apresentados (ver item 3.2 Modelagem dos arquivos gerais). Com isso foram gerados 40 arquivos do tipo orientação_modelo_PAF, já que cada um dos cinco modelos (1:1, 1:2, 1:3, 2:1 e 3:1) teve quatro PAF's (10, 40, 70 e 100%) e duas orientações conjuntamente (Norte-Sul, Leste-Oeste), conforme pode ser observado na Figura 21.

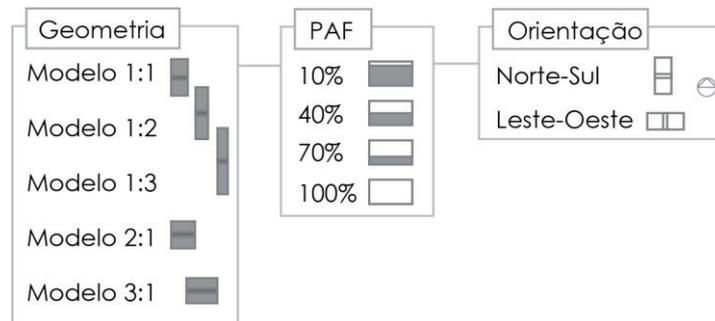


Figura 21 - Combinações dos modelos com as variações do trabalho

3.5 Modelagem da ventilação natural

A simulação da ventilação natural foi realizada a partir do *EnergyPlus* com o *AirflowNetwork*, criando-se um arquivo .idf com as características pertinentes. Os grupos utilizados nesse arquivo foram: *Simulation Control*; *MultiZone Zone*; *MultiZone Surface* e *MultiZone Component Detailed Opening*. Os parâmetros foram definidos tendo como referência o trabalho de ventilação híbrida de Brugnera (2014), Rupp (2011) e o Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no *EnergyPlus* (PEREIRA et al., 2013).

Em *Simulation Control* foram feitas as seguintes considerações gerais do módulo: ambiente considerado multizona sem distribuição; coeficientes de pressão do vento médios, calculados automaticamente pelo próprio programa, sendo iguais para toda a fachada; e edifício de baixa altura (*LowRise*) com uma quantidade mínima de 9 andares e máxima de 25 andares, de acordo com as definições do programa.

Em *MultiZone Zone* e *MultiZone Surface* o controle da ventilação natural fornecida pelas janelas foi definido através da temperatura, com uma temperatura interna de controle (*setpoint*) de 20°C (TCv), devido aos trabalhos já observados na revisão bibliográfica que se utilizaram desse valor para manter a ventilação natural (DOUBLE; DE DEAR, 2012; BRUGNERA, 2014). As portas foram mantidas fechadas

durante todo o tempo. Com isso as janelas foram abertas se três requisitos fossem cumpridos em relação à ventilação natural:

- 1) Temperatura da zona maior que a temperatura externa;
- 2) Temperatura da zona maior que a temperatura de controle para a ventilação natural;
- 3) Padrão de uso de controle da ventilação natural permitir a ventilação.

Por fim, em *MultiZone Component Detailed Opening*, onde se define as propriedades das aberturas, as janelas e portas nessa pesquisa foram consideradas do tipo não pivotante, representando uma abertura de 100% do vão. As janelas foram consideradas com uma esquadria de metal e as portas de abrir, feitas de madeira, 1 folha, que são as mais utilizadas. A Tabela 15 resume os principais parâmetros e fornece outros mais específicos utilizados na simulação.

Tabela 15 - Dados de entrada do AirflowNetwork

Gerais		
Controle do AirflowNetwork	Multizona sem distribuição	
Tipo de coeficiente de pressão do vento	Cálculo médio da superfície	
Tipo de Edifício	Edifícios baixos	
Angulo do azimute ao longo do eixo maior do edifício	Depende da orientação	
Razão entre o eixo menor e o eixo maior do edifício	Depende do modelo	
Tipo de Controle	Por temperatura	
Temperatura de Controle	20°C	
Detalhes das aberturas		
Parâmetros	Janela	Porta
Coeficiente (kg/s.m)	0,001	0,001
Expoente (n)	0,65	0,65
Número de frações de abertura	2	2
Fator de abertura 1	0	0
Coeficiente 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	0	0
Fator de altura inicial para o fator de abertura 1	0	0
Fator de abertura 2	1	1
Coeficiente de descarga para o fator de abertura 2	0,6	0,6
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

Os dados de entrada que não foram mencionados foram considerados os padrões do *EnergyPlus*. Esse grupo compõe um arquivo base somente com grupos para a simulação da ventilação híbrida (arquivo texto .idf, denominado *idf_base_vh*, ver item 3.7 Modelagem da ventilação híbrida).

3.6 Modelagem do ar condicionado

Em relação ao sistema mecânico selecionou-se o ar condicionado do tipo ideal, que informa a quantidade de carga térmica necessária para manter o ambiente dentro das temperaturas estabelecidas. Sua eficiência é considerada de 100%, ou seja, tem a capacidade de resfriamento/aquecimento igual à potência de energia consumida (Coeficiente de Eficiência Energética – CEE, de 1 W/W). Através da classe dos objetos *HVAC Template*, com os grupos *Thermostat* e *Ideal Loads Air System*, configurou-se os parâmetros para o ar condicionado, definindo-se dois padrões de uso, um de aquecimento e um de resfriamento, para o termostato, sendo que ambos funcionam de maneira a manter a temperatura de controle para aquecimento de 18°C e de 25°C para resfriamento, durante a semana, das 8h às 18h. Esses padrões foram escolhidos devido às referências encontradas na literatura para edificações de modo misto (BRUGNERA, 2014; DE VECCHI, 2015; DEUBLE; DE DEAR, 2012; DRAKE et al., 2010; KARAVA et al., 2012). A Tabela 16 indica os principais parâmetros de entrada para a modelagem do ar condicionado. Os itens que não foram citados foram considerados como padrão do programa *EnergyPlus*.

Tabela 16 - Dados de entrada principais do ar condicionado

Termostato	
Padrão de Aquecimento	Das 8-18, quando a temperatura interna atingir 18°C
Padrão de Resfriamento	Das 8-18, quando a temperatura interna atingir 25°C
Sistema de ar condicionado ideal	
Zonas térmicas com condicionamento	Salas comerciais (Z1 e Z3)

Esse grupo compõe o arquivo base para a simulação da ventilação híbrida (arquivo texto .idf, denominado *idf_base_vh*), e também um arquivo base para a simulação com o ar condicionado de forma constante, sem a ventilação natural, para se observar os modelos de modo misto (arquivo texto .idf, denominado *idf_base_ac*).

3.7 Modelagem da ventilação híbrida

A modelagem da ventilação híbrida foi realizada com a combinação da ventilação natural, através do grupo *Airflow Network* e do sistema mecânico, feito a partir do controle do modelo de condicionador de ar ideal, do grupo *HVAC Template: Zone: Ideal Loads Air System*. Os sistemas atuaram de maneira alternada, na saleta comercial, onde a ventilação natural foi programada para ser utilizada sempre que possível e o ar condicionado somente quando preciso. Essa situação na realidade representaria um ambiente contendo um sistema automático, integrando a abertura das janelas com o acionamento e desligamento do ar condicionado ou um ambiente com o controle manual por usuários ativos e ideais. Nesta última situação, os usuários deveriam abrir a janela sempre quando as condições forem favoráveis, desligando-se o ar condicionado, visualizando-se essa disponibilidade através de um sensor que mostrasse essa possibilidade, por exemplo.

Essa integração pode ser feita através de padrões de uso com um controle por temperatura, para controlar os momentos em que a ventilação ou o ar condicionado seriam acionados na simulação. Considerou-se a temperatura de controle 20°C para permitir o uso da ventilação natural, e de 25°C para permitir o acionamento do ar condicionado no modo de resfriamento e 18°C para permitir no modo de aquecimento, como já foi mencionado. O funcionamento desses sistemas é realizado a partir de padrões de uso (*schedules*) e pode ser verificado com o gerenciador de ventilação híbrida, *Availability Manager Hybrid Ventilation*, que proporciona a observação dos sistemas em relação ao desligamento/acionamento do ar condicionado (de 1 até 2) e da abertura/fechamento das janelas (de 0 até 1), conforme indica a Tabela 17.

Tabela 17 - Formas de controle da ventilação híbrida

Opções	Hybrid Ventilation Control Status	Hybrid Ventilation Control Mode
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

Fonte: EERE (2014)

3.8 Integração das simulações

Para finalizar as simulações foram necessários alguns ajustes devido aos diferentes programas utilizados. As integrações realizadas foram:

1. **Padrão de uso da iluminação artificial** (arquivo de texto em **.csv**), criado pelo **DIVA-for-Rhino** para os **módulos** do **EnergyPlus** (arquivo de texto **.idf**, classificado para cada **modelo_orientação_PAF**): realizada a partir da indicação do local do arquivo criado pelo **DIVA-for-Rhino** no grupo do **EnergyPlus** chamado *Schedule File*. Com isso o padrão de iluminação artificial utilizado pelo **EnergyPlus** passou a indicar a potência utilizada de hora em hora de um sistema dimerizável, que só é utilizado para complementar a iluminância natural analisada pelo **DIVA-for-Rhino** (80 simulações).
2. **União dos arquivos** criados com todas as **variações paramétricas** (arquivo de texto em **.idf**, classificado como **modelo_orientação_PAF**) com os **arquivos** de **ventilação híbrida** e **ar condicionado** (arquivo de texto em **.idf**, denominados **idf_base_vh** e **idf_base_ac**): Os arquivos foram integrados, unindo-se os arquivos **.idf** e corrigidos para cada modelo, chegando-se aos arquivos finais (80 simulações), que foram analisados.

3.9 Variações extras

Foram escolhidos alguns modelos, apenas com a orientação norte, para se realizar uma última sequência de simulações, alterando os seguintes parâmetros dos arquivos:

- Modelo 1:3, todos os PAF's: Aumentou-se o nível de carga térmica dos equipamentos, da carga média já utilizada, 10,7 W/m², para uma alta, 21,5 W/m² (ABNT, 2008b). Reduziu-se a abertura efetiva do vão de ventilação da janela, de 100% para 50%. Apenas para a sala operando no modo híbrido.
- Modelo 3:1, todos os PAF's: Diminuiu-se o nível de carga térmica dos equipamentos, da carga média de 10,7 W/m² para uma carga leve de 5,4 W/m² (ABNT, 2008b). Aumentou-se a temperatura de controle do acionamento do ar condicionado, de 25°C para 26°C. Apenas para a sala operando no modo híbrido.

- Todos os Modelos (1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1): Dimensionados mais dois PAF's, de 20 e 30%, para a sala operando no modo híbrido e com ar condicionado constante.

É importante observar que os parâmetros foram alterados individualmente para cada simulação e não de forma conjunta, de maneira que foram realizadas mais 46 simulações, envolvendo o *EnergyPlus* e o *Diva-for-Rhino*.

3.10 Análise dos resultados

Para a análise dos dados de saída obtidos com o processo integrado de simulação foram elaboradas planilhas automáticas, otimizando o processo de geração de gráficos. Essas planilhas consistem em arquivos do Excel, com páginas internas interligadas a partir de vínculos e fórmulas (presentes no próprio programa) para a criação de cada tipo de gráfico, sendo somente necessário inserir os dados de saída do *EnergyPlus* e *DIVA-for-rhino* (arquivos textos em .csv) nos locais indicados. Com isso, foi possível realizar a visualização de todos os modelos simulados de forma mais rápida e eficiente, auxiliando na análise dos resultados. A Figura 22 apresenta um diagrama exemplo da organização e conexões de uma planilha automática, chegando até a criação dos gráficos.

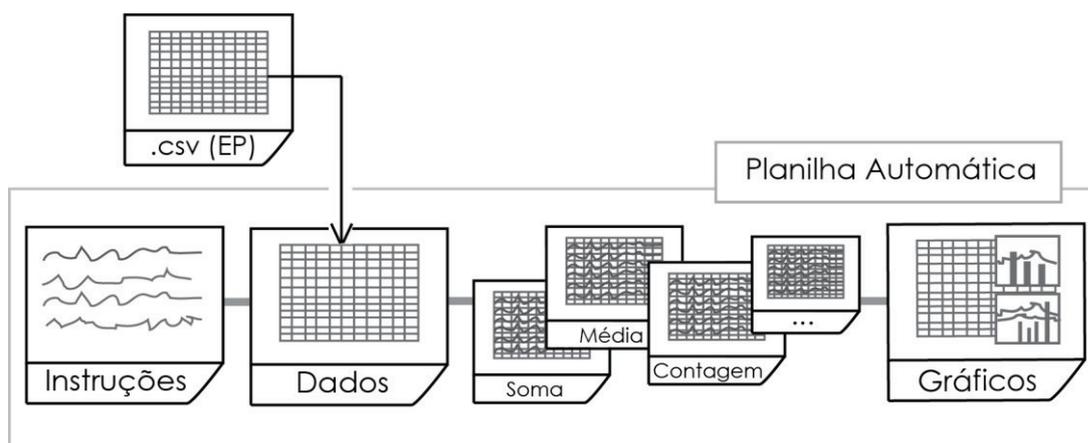


Figura 22 - Exemplo da organização de uma planilha automática

Com esses gráficos automáticos foi possível analisar os modelos, verificando-se: o padrão de funcionamento da ventilação natural, do ar condicionado, da iluminação natural e da iluminação artificial durante o período ocupado; os ganhos

e perdas de calor do ambiente e; a redução do consumo de energia e risco de ofuscamento.

Para o cálculo da redução do consumo de energia do ar condicionado foram utilizados os dados brutos do ar condicionado ideal simulado, sendo que caso fosse considerado um ar condicionado do tipo não ideal, os valores de consumos seriam diferentes, mas a relação da redução do consumo seria mantida. Porém para se observar a redução do consumo de energia total da sala (luz, equipamentos e ar condicionado) o ar condicionado ideal foi convertido para *Split*, assim aproximam-se os valores do ar condicionado para um sistema real e a ordem de grandeza pode ser comparável com os outros usos (equipamentos e luz). Essa conversão foi realizada a partir da alteração de seu nível de eficiência (Coeficiente de Eficiência Energética – CEE) de 1 W/W para o valor mais comum encontrado de um ar condicionado real *Split*, de 3,24 W/W (INMETRO, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram divididos em relação ao tipo de análise realizada para as saletas comerciais localizadas na cidade de São Paulo, com uso da ventilação híbrida ou com o ar condicionado de forma constante. Foram feitas 160 simulações para módulos dessas salas com diferentes geometrias, percentual de área de abertura da fachada (PAF) e orientações. As saletas comerciais simuladas possuem a mesma área (em torno de 36 m²) com cinco alterações de proporção, entre a largura e profundidade, sendo elas: uma sala com área quadrada (Modelo 1:1), duas salas com uma profundidade maior que a largura (Modelo 1:2 e Modelo 1:3) e duas salas com uma profundidade menor que a largura (Modelo 2:1 e Modelo 3:1). As principais variações analisadas foram com os PAF's de 10, 40, 70 e 100%, voltados para as orientações norte, sul, leste e oeste.

A partir dos gráficos automáticos gerados com os dados de saída em arquivo texto (.csv) do *EnergyPlus* e do *DIVA-for-Rhino*, foram realizadas as seguintes análises: do padrão de funcionamento da iluminação natural complementada pela artificial; dos casos com ventilação híbrida e com ar condicionado constante; dos ganhos e das perdas de calor nesses ambientes e; da redução do consumo de energia do modo misto em relação ao caso com ar condicionado constante, observando o risco de ofuscamento atingido nesses ambientes.

As análises foram agrupadas para um melhor entendimento dos conceitos, sendo realizada primeiramente uma descrição mais detalhada para um único modelo e, posteriormente, avaliações mais abrangentes, observando os principais fenômenos e diferenças entre os modelos. Os principais gráficos para todas as simulações constam no APÊNDICE C. O Modelo 1:1 foi escolhido para realizar a análise mais detalhada, com o PAF de 40% na fachada norte, seguido de uma análise para todos os PAF's na mesma fachada, e por fim de todos os PAF's para todas as orientações (Modelo 1:1). Com isso, foi possível observar e identificar padrões que poderiam se repetir ou não nos outros modelos, comparando-os e verificando quais apresentaram um menor consumo de energia com o uso da ventilação híbrida e um maior uso da iluminação natural, destacando-se os riscos de ofuscamento (Modelos 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1).

A partir dos resultados, alguns modelos com a orientação norte, foram selecionados para uma última investigação. Questões como o consumo do ar

condicionado e o risco de ofuscamento foram observadas ao se alterar outros parâmetros, como: as cargas térmicas dos equipamentos, a temperatura de controle do ar condicionado, a abertura efetiva do vão da janela e outros PAF's. Desta forma, foram realizadas mais 46 simulações, totalizando neste trabalho 206 simulações.

Para a melhor compreensão dos gráficos é necessário relembrar as abreviaturas e siglas, conforme indica a Tabela 18.

Tabela 18 - Siglas e nomenclaturas presentes nos resultados

VN	Ventilação natural
ACc	Ar condicionado constante
ACv	Ar condicionado da ventilação híbrida
AC	Ar condicionado geral (ambos os casos)
VH	Ventilação híbrida ou modo misto (VN e ACv)
IA	Iluminação artificial
IN	Iluminação natural
EQ	Equipamentos
PAF	Percentual de área de abertura na fachada (%)
Ti	Temperatura interna do ar (°C)
Te	Temperatura externa do ar (°C)
TCv	Temperatura de controle da ventilação (°C)
TCa	Temperatura de controle do ar condicionado (°C)
UDI	Iluminância Útil da Luz Natural (%)

4.1 Padrão de funcionamento da iluminação natural e artificial

A utilização da iluminação artificial (IA) para os modelos simulados foi considerada sempre dimerizável, desta forma há um maior aproveitamento da iluminação natural (IN) nos ambiente durante o ano todo. Os gráficos apresentados são idênticos tanto para o caso com ventilação híbrida como para o caso com ar condicionado constante, pois as horas em que ocorre o acionamento da iluminação artificial independem da estratégia de resfriamento adotada.

a) Modelo 1:1, todos os PAF's e todas as orientações

Na sala comercial com geometria 1:1, ou seja, com um piso de formato quadrado analisou-se, primeiramente, o padrão de funcionamento da iluminação natural e artificial com o PAF de 40% e orientação norte, seguido da alteração da

abertura na fachada (PAF's de 10, 70, 100%) e, posteriormente, pela alteração de orientação (sul, leste e oeste).

A Figura 23 mostra o aproveitamento da iluminação natural (IN) em comparação ao acionamento da iluminação artificial (IA) para o modelo em questão, com PAF de 40% e orientação norte, ao longo dos meses e no ano. Observa-se que, ao longo do ano, em média, aproveita-se a luz do dia em mais de 80% do tempo. Complementando a Figura 23, a Figura 24 faz relação às horas ocupadas durante o ano, indicando o uso da IN e da IA. O maior aproveitamento da iluminação natural é observado das 8 às 16 horas, com uma utilização muito pequena e semelhante da iluminação artificial ao longo dessas horas. A iluminação artificial é mais utilizada no final do período ocupado, das 16 às 18 horas, devido à menor disponibilidade de luz ao entardecer.

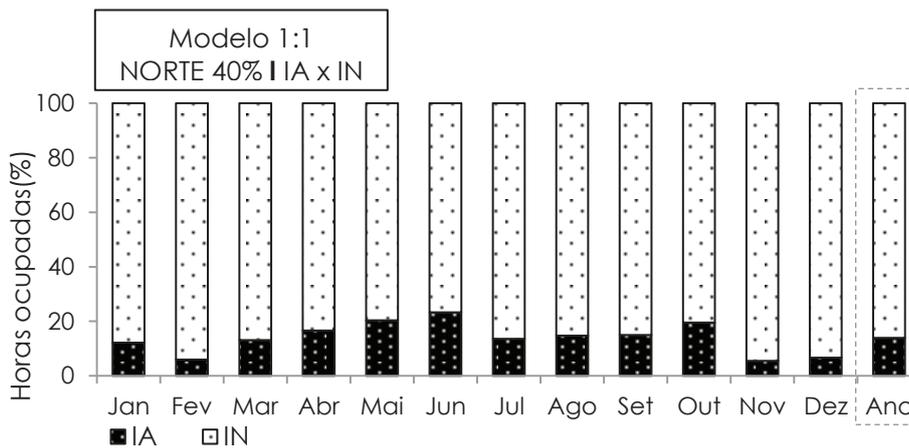


Figura 23 - Uso da iluminação durante os meses do ano para uma variação do Modelo 1:1

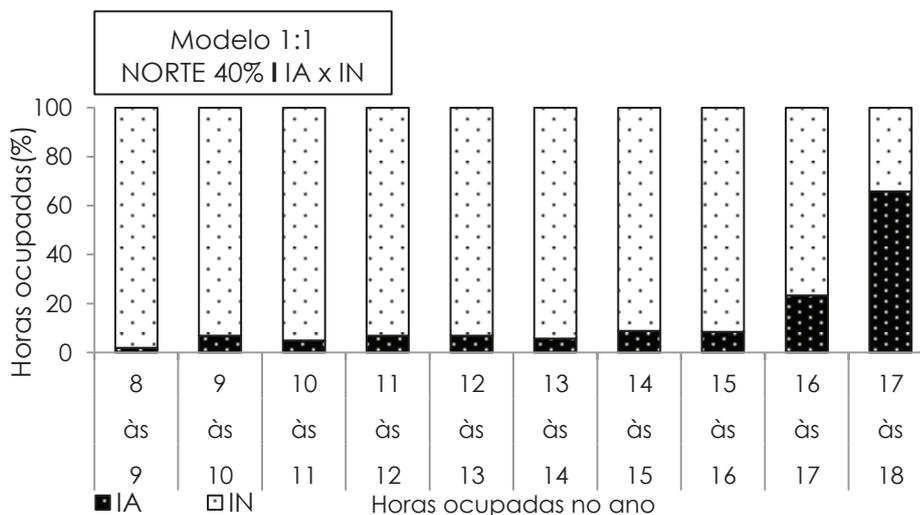


Figura 24 - Uso da iluminação durante as horas ocupadas no ano para uma variação do Modelo 1:1

Conforme indica a Figura 25, ao realizar a alteração do PAF nesse modelo (de 40% para 10, 70 e 100%, na fachada norte) verificou-se que o PAF de 10% é o que apresenta uma maior divergência em relação aos outros PAF's (40, 70 e 100%). Os PAF's de 70 e 100% apresentam um comportamento muito similar ao do PAF de 40%, já indicado nas Figuras 23 e 24.

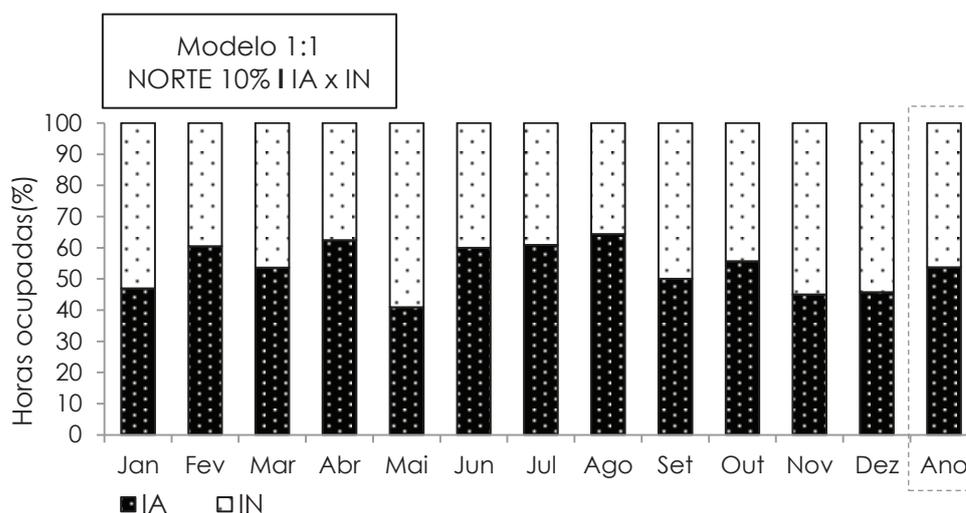


Figura 25 - Uso da iluminação durante os meses do ano do Modelo 1:1, PAF 10%, orientação norte

Houve um aumento da porcentagem de horas com luz artificial anuais com o PAF de 10%, sendo na média, maior que 50% do tempo, devido à pequena área envidraçada na fachada. Essa diferença, apenas para o PAF de 10%, indica que, conforme se aumenta o PAF (a partir de 40%), a disponibilidade da iluminação natural no ambiente é praticamente a mesma, sendo o uso da iluminação artificial dimerizável muito próximo. Conforme apresenta a Figura 26, com relação aos horários em que a iluminação artificial é acionada, é também observada uma maior diferença para o PAF de 10%, chegando a atingir mais que 50% do tempo ocupado a partir das 14 horas, alcançando quase 80% das 17 às 18 horas.

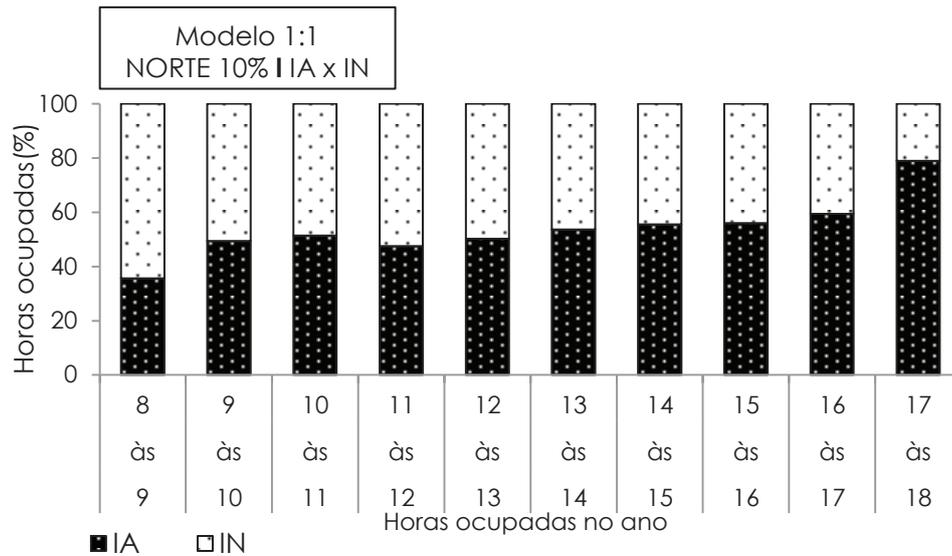


Figura 26 - Uso da iluminação durante as horas ocupadas no ano do Modelo 1:1, PAF 10%, orientação norte

A alteração da área de abertura na fachada tem influência no conforto visual neste ambiente, e um indicador importante que pode ser observado é o risco de ofuscamento a partir do critério de Iluminância Útil da Luz Natural (*Useful Daylight Illuminance*, UDI). Na Figura 27 observa-se que os maiores riscos de ofuscamento (pontos com iluminância maior que 2000 lx) ocorrem em pontos mais próximos à janela (Grupo de pontos 1), durante o período ocupado no ano.

No modelo com o PAF de 40% e orientação norte, o ponto com maior probabilidade de ofuscamento permanece em 71% do tempo com uma iluminância maior que 2000 lx, podendo gerar um incômodo para as pessoas que estão localizadas a essa distância. Verifica-se também uma diferença no UDI maior entre o PAF de 10% e os de 40, 70 e 100%. O aumento da área envidraçada fornece uma iluminação natural com níveis de iluminância maiores no ambiente. Caso sejam utilizados como parâmetros os pontos mais próximos à janela para a identificação e análise do risco de ofuscamento, o PAF de 10% seria o único com valores menores, com no máximo 12% ao longo do período ocupado no ano, enquanto que os PAF's de 40, 70 e 100% apresentam riscos maiores que 70% do tempo, em média, durante o período ocupado.

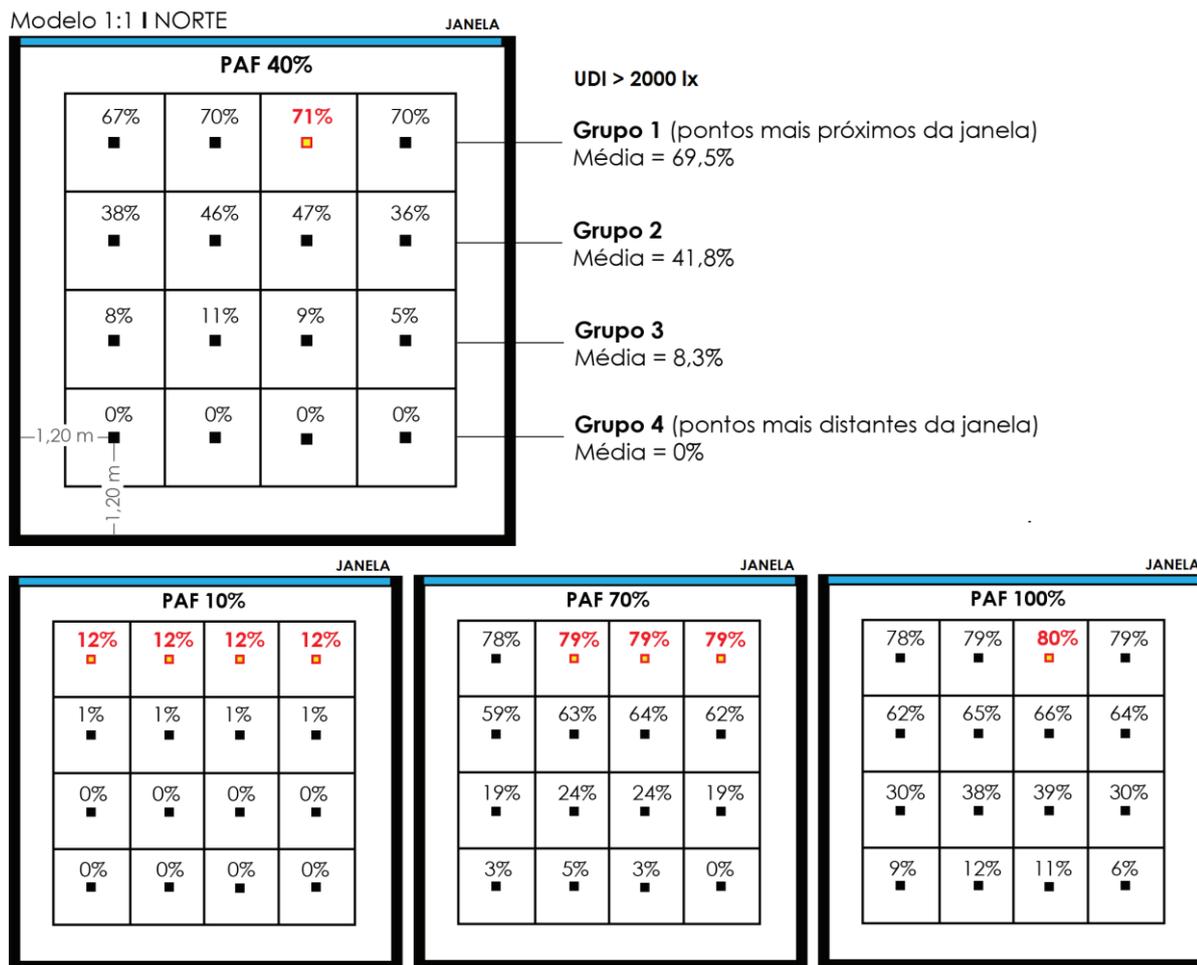


Figura 27 - Porcentagem do período ocupado com uma iluminância > 2000 lx ao longo do ano em cada ponto do Modelo 1:1, todos os PAF, orientação norte

Ao realizar a alteração da orientação deste modelo para leste, oeste e sul com todos os PAF's, não ocorreram grandes diferenças de padrões. A Figura 28 apresenta a quantidade de horas com o uso da IN e da IA, no Modelo 1:1, com os PAF's de 10 e 100% para todas as orientações, durante o ano. De forma geral, as orientações norte e leste apresentam maior aproveitamento da iluminação natural em comparação às orientações sul e oeste. Essas diferenças foram mais evidentes com o menor PAF, de 10%. Assim, a alteração na mudança de orientação teve uma influência maior para uma área envidraçada menor (PAF de 10%). Conforme se aumenta a área envidraçada, essas diferenças ficam cada vez menores, tornando-se praticamente mínimas (PAF's de 40, 70 e 100%). As diferenças ao longo dos meses e durante as horas do período ocupado não foram significativas, seguindo os gráficos a mesma tendência já observada com os PAF's de 10, 40, 70 e 100% para a orientação norte.

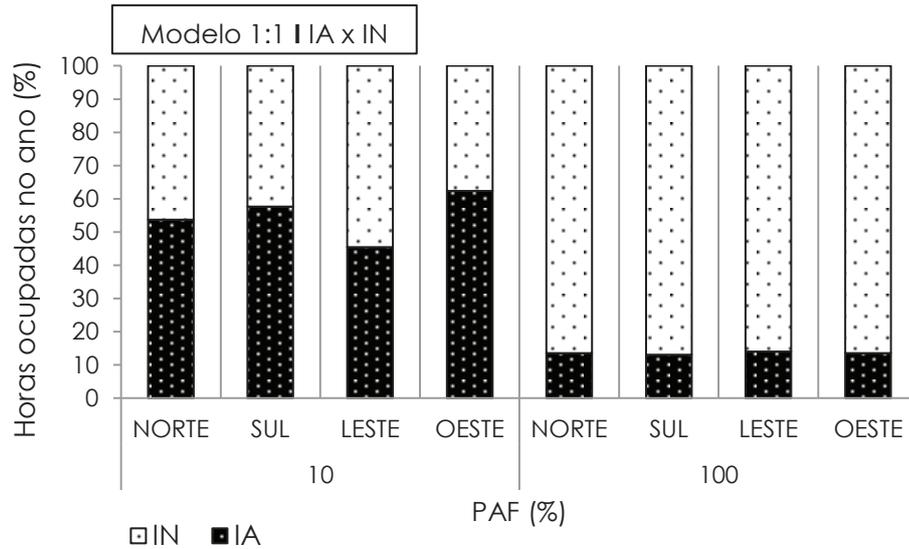


Figura 28 - Uso da iluminação durante o ano do Modelo 1:1, PAF's 10 e 100%, todas as orientações

Como a alteração da orientação da fachada envidraçada teve pouca influência no padrão de comportamento da iluminação natural e da iluminação artificial, a Figura 29 mostra uma análise da iluminação natural do ambiente como um todo a partir das médias das faixas do critério UDI, para o Modelo 1:1 com as diferentes orientações e PAF's.

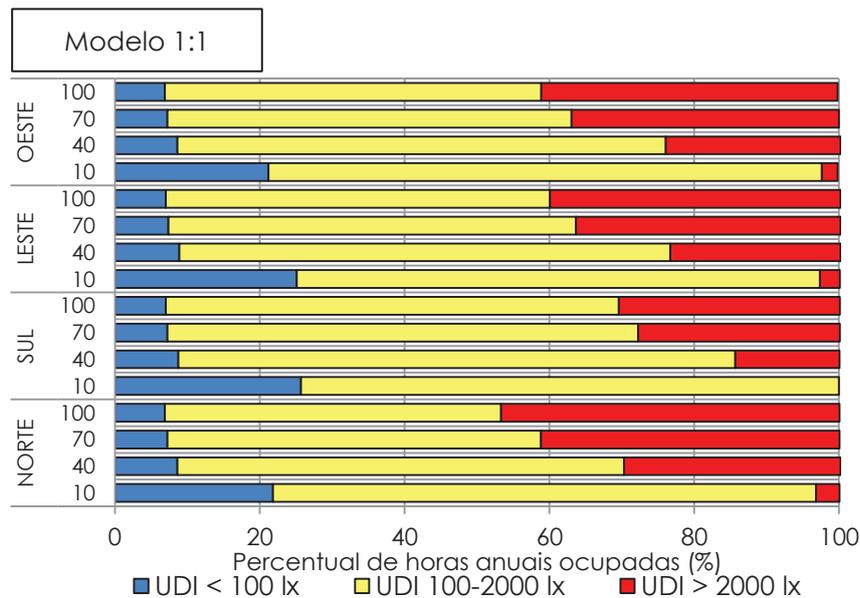


Figura 29 - Percentual de iluminância insuficiente (<100 lx), útil (100-200lx) e excessiva (>2000 lx) para o Modelo 1:1

Observa-se nessa figura o padrão de comportamento da iluminação natural no ambiente. Verifica-se que a orientação norte possui um maior percentual de

horas com uma iluminância maior que 2000 lx do que as outras orientações, o que pode gerar um maior risco de ofuscamento nesse ambiente, como já observado na Figura 27. A orientação sul representa um menor percentual desse risco de ofuscamento, permanecendo com iluminância útil (100-2000 lx) por mais tempo. As orientações leste e oeste possuem um comportamento muito semelhante com os PAF's maiores, refletindo no uso da iluminação artificial, que possuem o mesmo padrão.

b) Modelos 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1

A partir da Figura 30, observa-se que ao se alterar a geometria da sala, o padrão de funcionamento do tempo de uso da iluminação artificial e da iluminação natural teve uma maior diferença para as salas mais largas e pouco profundas (Modelos 2:1 e 3:1). Estas tiveram um uso menor da iluminação artificial, seguidas pela sala quadrada (Modelo 1:1) e posteriormente pelas salas mais profundas (Modelo 1:2 e 1:3). A alteração das orientações não foi significativa nas diferentes geometrias, sendo destacadas as diferenças com a alteração dos PAF's. Observa-se que, ao se aumentar a área de abertura na fachada em cada modelo, as maiores diferenças de horas com iluminação artificial estiveram presentes nas salas mais profundas (1:3 e 1:2), conforme a sala torna-se mais larga do que profunda, as diferenças tornam-se menores ao longo dos PAF's. Isso ocorreu devido ao alcance da iluminação natural dentro do ambiente. Como já visto na literatura (ALZOUBI; AL-ZOUBI, 2010; REINHART, 2005), sua eficácia é maior até certa distância da janela e depende do tamanho da abertura, de maneira que as salas mais estreitas permanecem com um aproveitamento maior da luz do dia e as mais profundas precisam de um maior uso da iluminação artificial para permanecerem com uma iluminação adequada. Além disso, os modelos 2:1 e 3:1 possuem uma área maior de janela se comparados aos outros modelos, 1:1, 1:2 e 1:3, devido à maior largura da fachada com a área envidraçada.

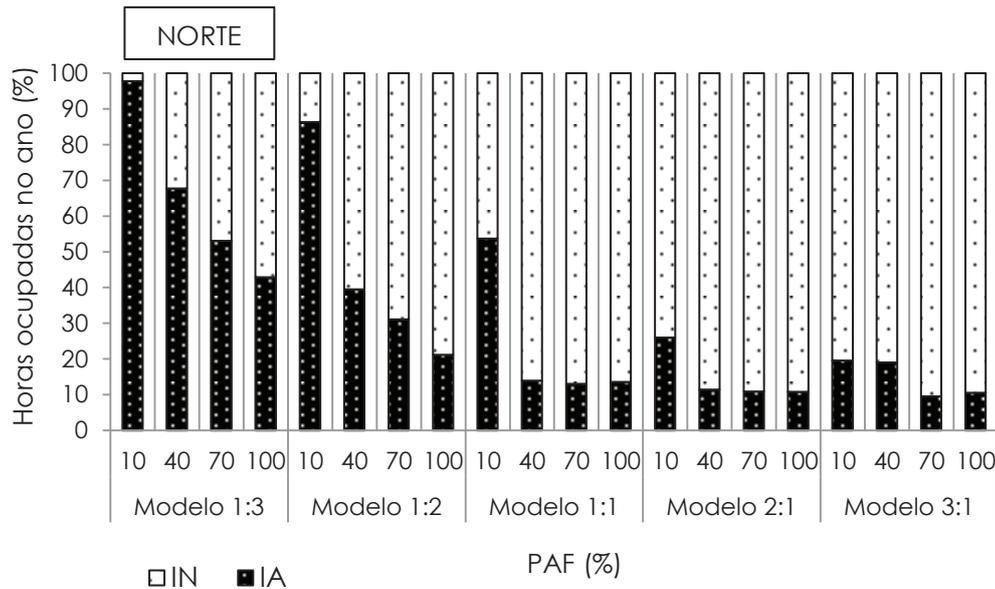


Figura 30 - Uso da iluminação durante o ano dos Modelos 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1, todos os PAF's, orientação norte

Com a Figura 31 é possível observar a iluminância média que cada um desses ambientes atinge ao longo do período ocupado através do critério UDI. A partir da mesma, verifica-se que, para um mesmo PAF, as salas mais estreitas e profundas (1:2 e 1:3) apresentam uma maior porcentagem do tempo com uma iluminância insuficiente ($UDI < 100 \text{ lx}$) o que faz com que haja o acionamento por mais horas da iluminação artificial nesses ambientes, contudo, o risco de ofuscamento e ganhos de calor em excesso ($UDI > 2000 \text{ lx}$) é menor também, devido a essa geometria. Em contrapartida as salas mais largas (2:1 e 3:1) apresentam ao longo do ano um percentual maior da área com faixas de iluminância maiores que 2000 lx , gerando um elevado risco de ofuscamento, principalmente com os PAF's de 40, 70 e 100%. A sala com geometria 1:1, apresentou um comportamento intermediário. E também é evidente, através da Figura 31, que o aspecto que mais influencia na disponibilidade de luz natural nas salas é o PAF.

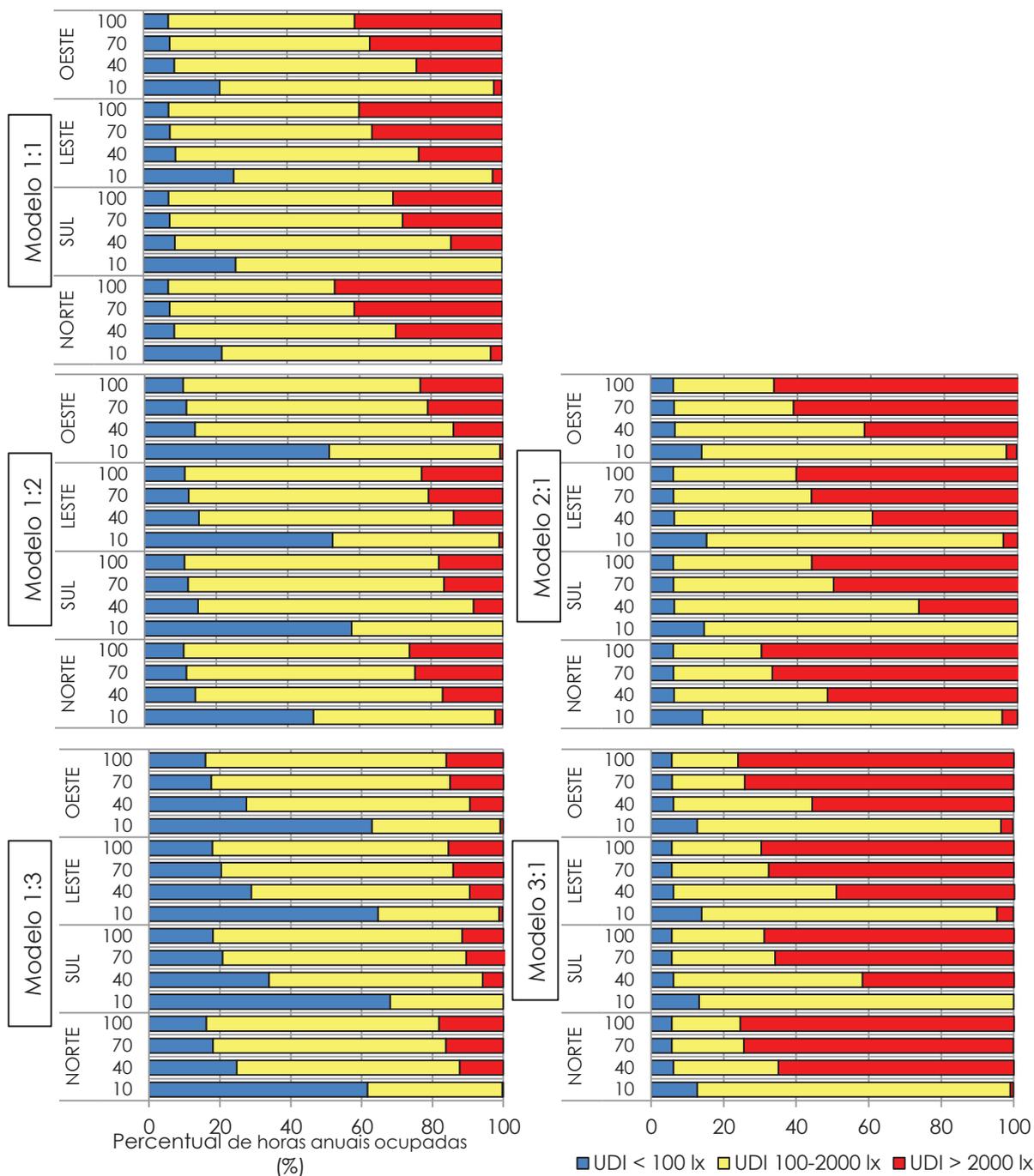


Figura 31 - Percentual de iluminância insuficiente (<100 lx), útil (100-200lx) e excessiva (>2000 lx) para todos os Modelos, todos os PAF's e todas orientações

4.2 Padrão de funcionamento da ventilação híbrida e do ar condicionado constante

a) Modelo 1:1, PAF 40% e orientação norte

O funcionamento do ar condicionado se diferencia para os casos com o uso desse equipamento o tempo todo (ACc) e com o uso da ventilação híbrida (VH, ACv). Para o modelo com geometria 1:1, PAF de 40% e orientação norte, nos dois casos, não houve horas em que o ar condicionado para aquecimento fosse utilizado. A Figura 32 apresenta um gráfico onde é possível observar a diferença entre o acionamento do ar condicionado para resfriamento para o caso ACc e para o caso com a ventilação híbrida, ACv, ao longo dos meses e do ano.

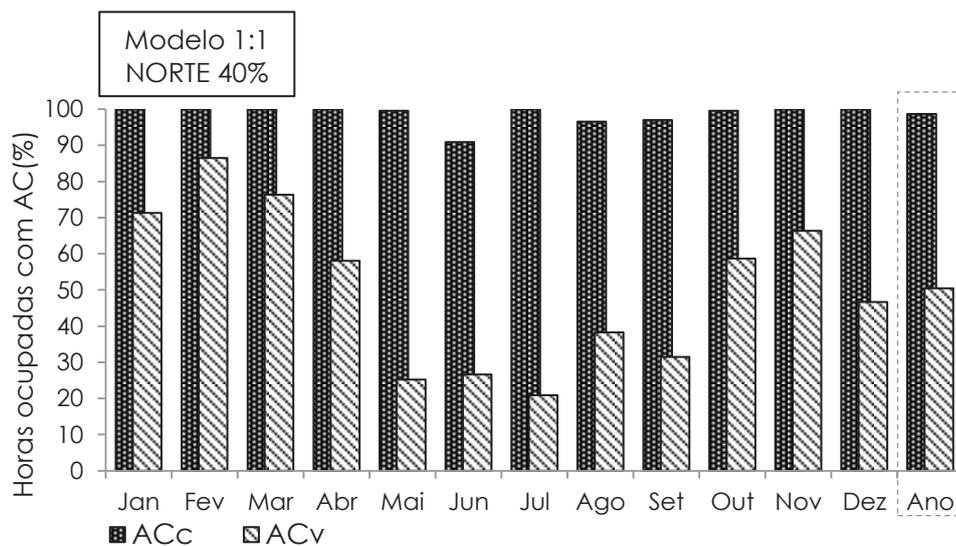


Figura 32 - Redução do uso do ar condicionado no modo misto comparado com o ar condicionado constante para uma variação do Modelo 1:1

Através da Figura 32, verifica-se que, para o caso com ar condicionado constante (ACc), o mesmo é acionado em mais de 90% do período ocupado no ano, reduzindo esse tempo drasticamente com o acionamento do ar condicionado no caso com a ventilação híbrida (ACv), em média, de 50% do tempo. Ao longo dos meses, no caso com ACc, não ocorrem variações significativas, sendo ele acionado sempre mais que 90% do tempo.

Já para o caso com a ventilação híbrida essa variação da quantidade de horas do uso do ar condicionado é bem maior, sendo bastante reduzida nos meses com menores temperaturas (especialmente de maio a setembro), devido ao potencial de aproveitamento da ventilação natural. Ou seja, no caso com o ar condicionado constante, como as janelas não podem ser abertas, a temperatura interna (Ti) passa a ser tão elevada que atinge o valor correspondente ao acionamento do ar condicionado, mesmo em períodos onde com a abertura das janelas a Ti poderia ser reduzida devido à entrada do ar externo.

Com isso, torna-se importante analisar atentamente o caso com ventilação híbrida (VH). A Figura 33 indica, para este modelo em questão, quando há ventilação natural (janelas abertas, VN), quando o ar condicionado é ligado (ACv) e quando há a ausência de ambos e as janelas permanecem fechadas ao longo dos meses e no ano (Sem ACv e VN), durante o período ocupado.

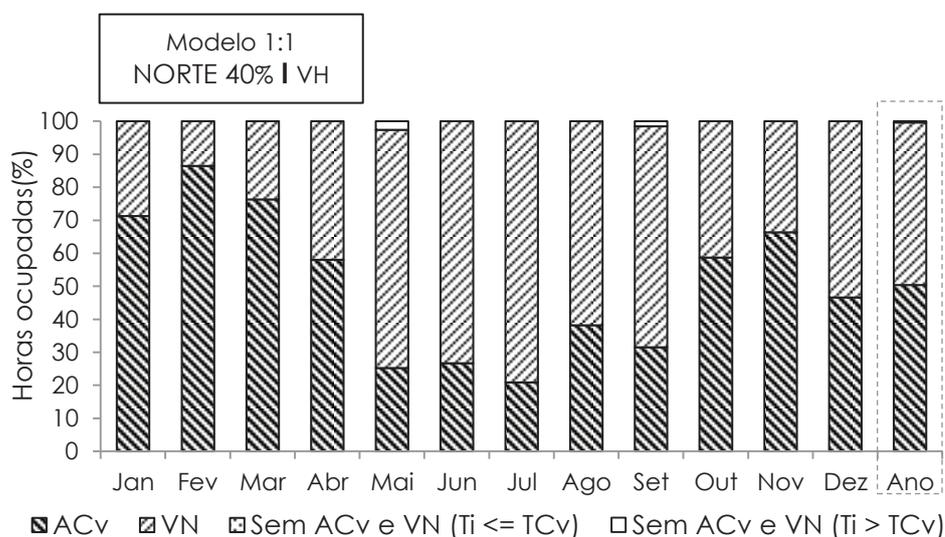


Figura 33 - Uso da ventilação natural e do ar condicionado para uma variação do Modelo 1:1 em cada mês e no ano

Conforme apresentado na Figura 33, no caso com ventilação híbrida (VH), o acionamento do ar condicionado (ACv), ocorreu, na maior parte do tempo, nos meses mais quentes do ano, de outubro a abril, sendo menor sua utilização de maio a setembro. O inverso ocorre com a ventilação natural (VN), com o maior potencial de utilização entre maio e setembro. O ar condicionado é acionado por mais tempo do que são abertas as janelas nos períodos mais quentes, devido ao fato da ventilação não conseguir manter o ambiente na faixa de controle estabelecida o tempo todo.

Podem ocorrer horas do período ocupado em que não há a abertura das janelas e não é acionado o ar condicionado (Sem ACv e VN). Isso pode acontecer devido a dois fatores, de acordo com o controle de temperatura estabelecido na simulação: quando a temperatura interna (Ti) for menor que a temperatura de controle da ventilação natural (TCv), ou seja, quando já está frio no ambiente interno, não havendo a necessidade em se utilizar a ventilação natural, ou; quando a temperatura interna (Ti) for maior que a temperatura de controle da ventilação (TCv) porém a temperatura externa (Te) é superior ou muito inferior à temperatura

interna (T_i), ou seja, quando há a necessidade de ventilação natural, porém a temperatura externa é muito elevada e vai tornar a temperatura interior ainda mais alta com a ventilação ou quando a temperatura externa é muito baixa a ponto de causar uma redução muito drástica da temperatura interior.

Estes casos ocorreram raras vezes ao longo do ano, conforme pode ser constatado na Figura 33, e observado em mais detalhe na Figura 34. A Figura 34 apresenta a quantidade de casos em que não são abertas as janelas e não é acionado o ar condicionado ao longo do ano, as médias máximas de T_i e T_e em que ocorreram esses casos e as temperaturas de controle do ACv (TCa) e da VN (TCv). Conclui-se que há o revezamento entre o tempo em que é utilizada a ventilação natural e o ar condicionado no período ocupado ao longo do ano, havendo raros momentos em que as janelas permanecem fechadas e o ar condicionado não é utilizado.

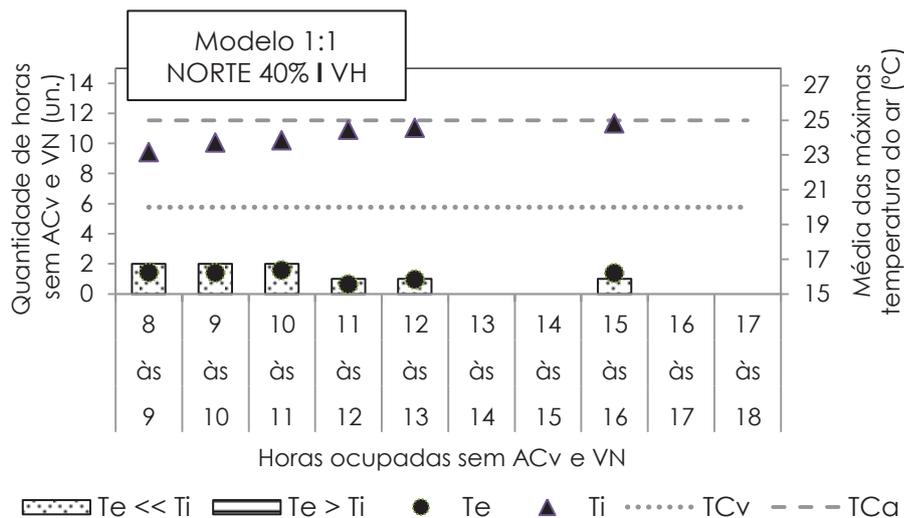


Figura 34 - Ocorrências de horas sem ACv e VN para uma variação do Modelo 1:1 ao longo do ano

Ainda com destaque para o caso com ventilação híbrida, a quantidade de horas em que a ventilação natural é utilizada pode ser verificada na Figura 35, que apresenta os horários em que são abertas as janelas ao longo do período ocupado em cada mês e no ano.

Ao longo do ano, no período em que ocorre a ventilação natural no modo misto, verificou-se que as janelas são abertas, principalmente, na primeira metade do período ocupado, das 8 às 13 horas, quase todos os meses, apresentando o mês de fevereiro a abertura da janela praticamente só nesse período. Nesses horários, o

aproveitamento da ventilação natural proporcionado pela abertura das janelas, ocorre em mais de 50% do tempo.

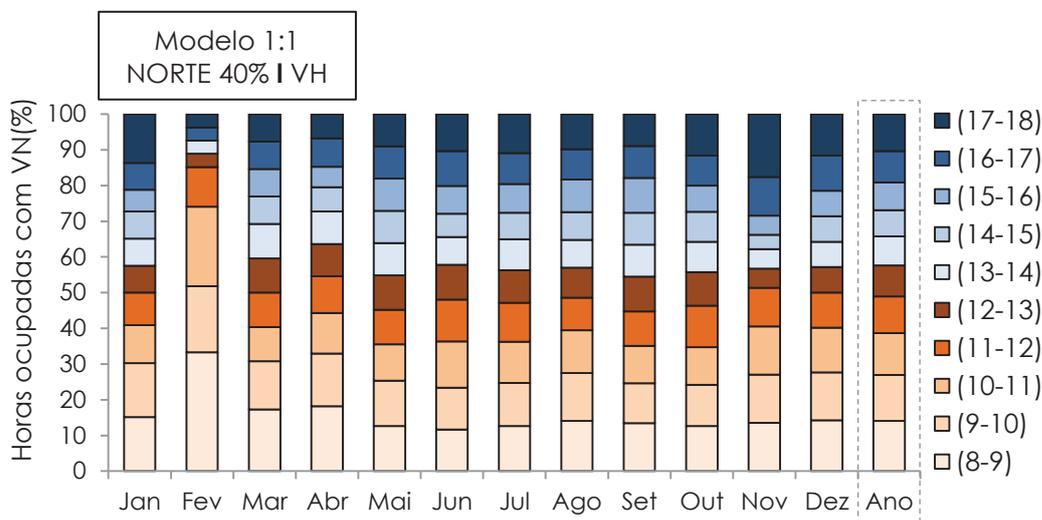


Figura 35 - Utilização da ventilação natural em cada hora por mês e no ano para uma variação do Modelo 1:1

Analisando-se os dias médios ocupados⁷ de cada mês na Figura 36 para o caso VH, é possível observar a temperatura externa do ar (T_e), a temperatura interna do ar da sala (T_i), a temperatura de controle para a ventilação natural (TC_v), a temperatura de controle para o ar condicionado no modo misto (TC_a), as renovações de ar por hora que ocorrem no ambiente e o fator de abertura da janela (indicado junto com o eixo de renovações de 0 a 10, representando a abertura do vão da janela de 0 a 100%) Os quatro meses destacados representam o comportamento de meses de verão (fevereiro), inverno (junho) e de meia estação: outono (abril) e primavera (outubro).

No mês de verão, fevereiro, a temperatura média interna se eleva a ponto de chegar a 25°C entre as 11 e 17 horas, e a temperatura média externa chega a ser maior que a temperatura interna. Isso faz com que a abertura das janelas não ocorra de forma constante, sendo maior o uso do ar condicionado para manter a temperatura nesses horários. Desta forma, a janela é aberta na maior parte do tempo no período da manhã. No mês de inverno, em contrapartida, a temperatura interna do dia médio permanece o dia todo entre as faixas de controle de temperatura estabelecidas no trabalho, de 20°C para a ventilação natural e 25°C para o acionamento do ar condicionado e a temperatura do ar externo é inferior

⁷ Dia médio ocupado: Representa um dia ocupado, calculado a partir das médias dos parâmetros dos dias ocupados. Pode se referir a um mês, ao ano, ou a um período específico.

ao interno, favorecendo assim a ventilação natural. Os meses de meia estação apresentam comportamento semelhante ao de inverno, com uma temperatura média interna entre 20 e 25°C e temperatura média externa menor que a interna na maior parte do tempo, possibilitando também a abertura das janelas. Contudo, outubro possui temperaturas médias externas superiores em relação a abril, ultrapassando em alguns momentos as temperaturas médias internas, diminuindo o período em que as janelas são abertas, resultando em menores renovações de ar no ambiente.

Outro aspecto notado em todos os meses, é que no período não ocupado (noturno e início do dia), a temperatura interna é sempre consideravelmente superior à externa, havendo uma queda significativa às 8 horas da manhã, quando as janelas são sempre abertas. De forma análoga, há um acréscimo nas temperaturas internas a partir das 18 horas, quando então as janelas são fechadas ou o ar condicionado é desligado.

A Figura 37 apresenta a mesma sequência de gráficos da Figura 36, contudo para o caso com o uso do ar condicionado constante (ACc), sem ventilação natural. Neste ambiente, as janelas e portas permaneceram fechadas, o que faz com que não ocorram, praticamente, renovações de ar e, conseqüentemente, a temperatura interna torne-se muito elevada, atingindo quase o tempo todo, a temperatura de controle do acionamento do ar condicionado (25°C).

De forma geral, os gráficos das Figuras 36 e 37 refletem o que já foi observado na Figura 33: que em grande parte do ano as condições são propícias para se beneficiar da ventilação natural. Quando esta não ocorre, há o acionamento do ar condicionado. Praticamente não há períodos com necessidade de aquecimento ou que as janelas devam permanecer fechadas, sendo desnecessário utilizar o ar condicionado de forma constante.

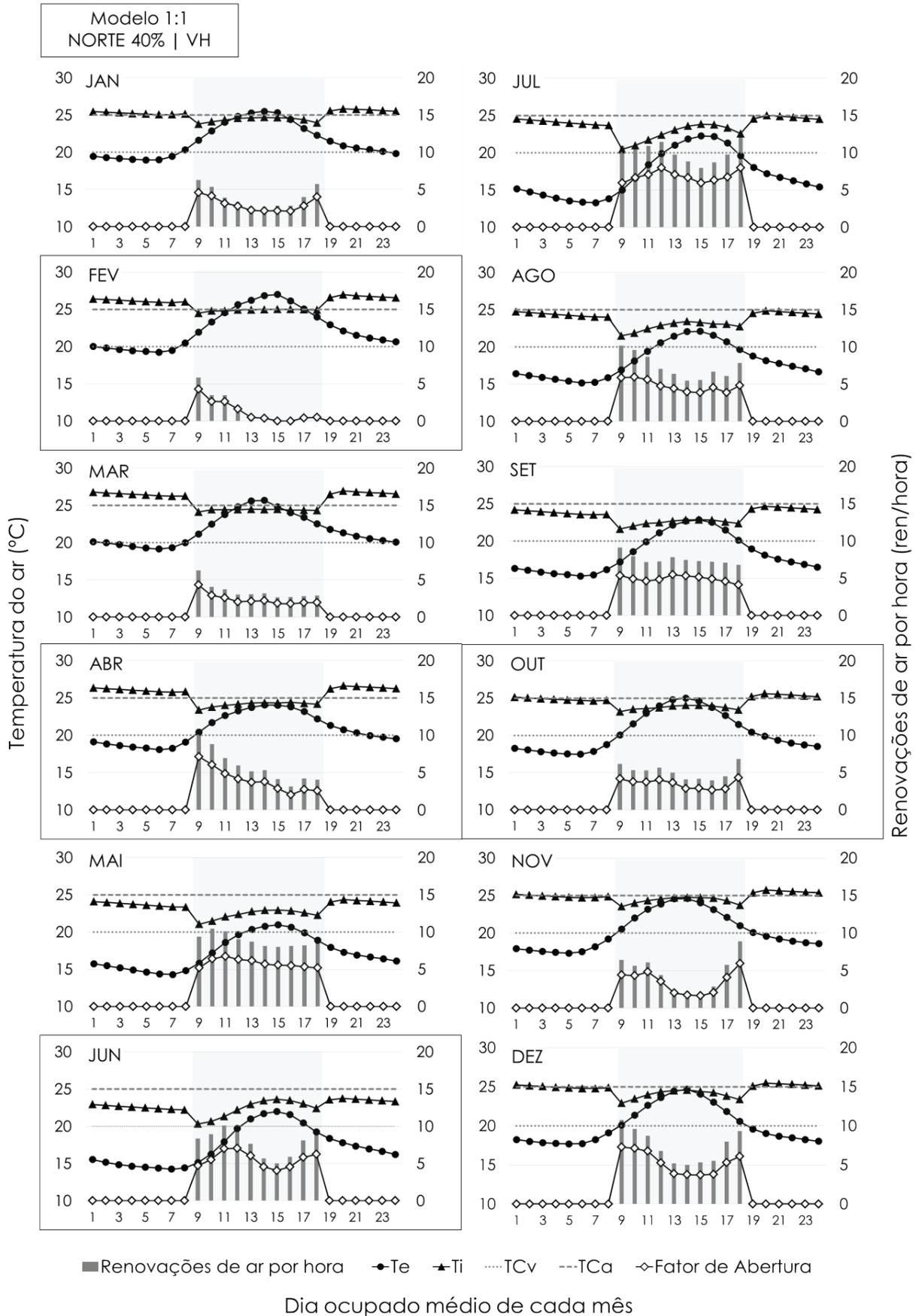


Figura 36 - Representação de um dia médio ocupado para cada mês para uma variação do Modelo 1:1 com VH

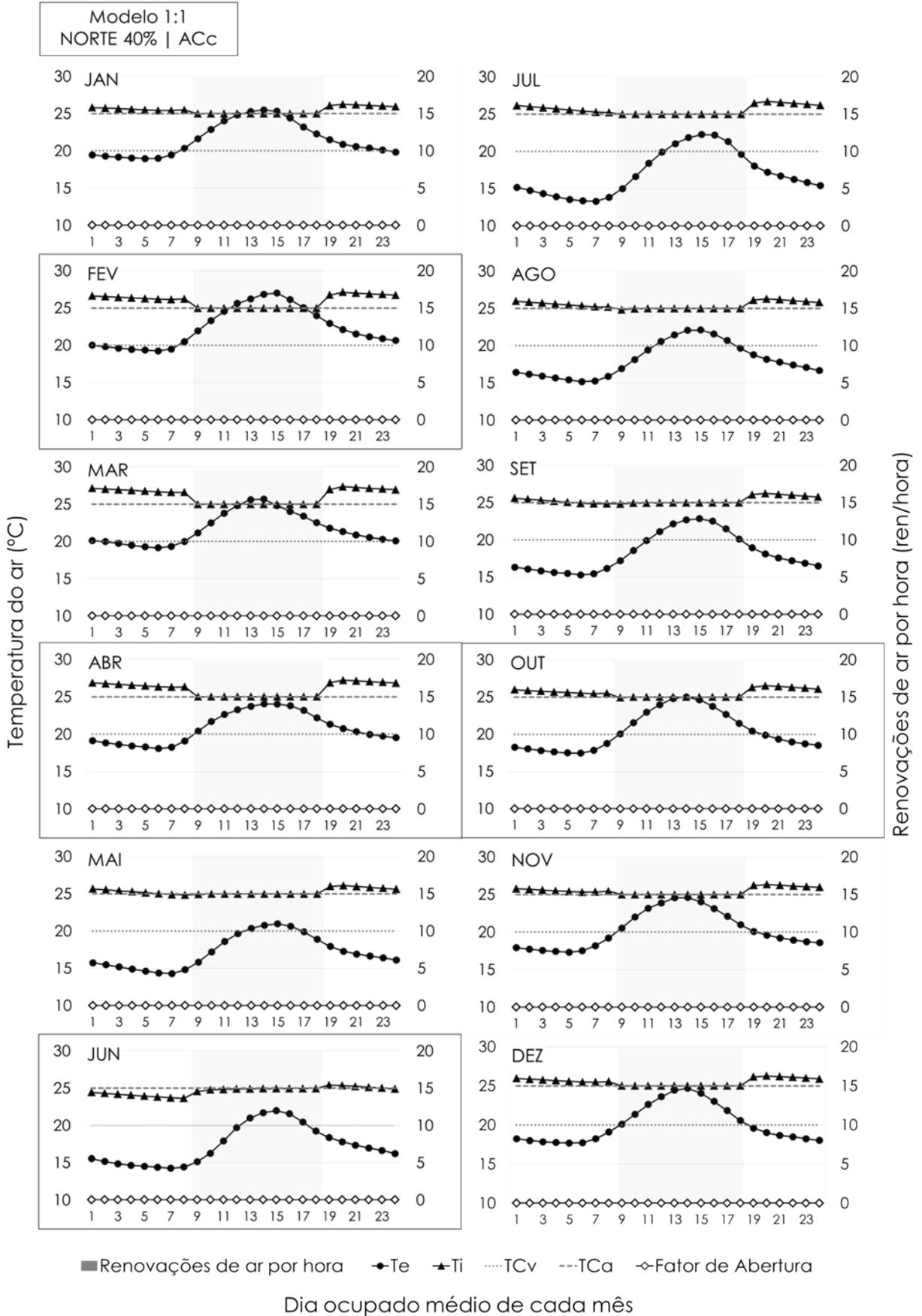


Figura 37 - Representação de um dia médio ocupado para cada mês para uma variação do Modelo 1:1 com ACc

b) Modelo 1:1, todos os PAF's e todas as orientações

Com a alteração do PAF na fachada norte verificou-se uma quantidade de horas em que o ar condicionado é ligado, nos casos ACv e ACc, muito semelhante entre os PAF's de 70, 100 e 40%. Conforme se aumenta a área envidraçada e, conseqüentemente, o vão para a ventilação, nos períodos mais quentes há um pequeno aumento da quantidade de horas em que a janela é aberta, havendo o maior uso da ventilação natural, enquanto que no inverno há um pequeno aumento das horas em que o ar condicionado é acionado, de maneira que ao longo do ano torna-se muito próxima a utilização de ambos entre os PAF's de 40, 70 e 100%. Em todos os modelos dos casos com VH, sempre foi utilizado o ar condicionado ou a abertura das janelas, com raras horas em que não é utilizado nenhum dos dois ao longo do ano, mantendo-se o padrão já observado com o PAF de 40%. A maior diferença entre os casos apresentou-se para o PAF de 10%, visto também no padrão de funcionamento da iluminação natural e artificial (ver item 4.1). Observa-se na Figura 38, uma maior quantidade de horas em que é acionado o ar condicionado (ACv) no caso VH em relação aos outros PAF's.

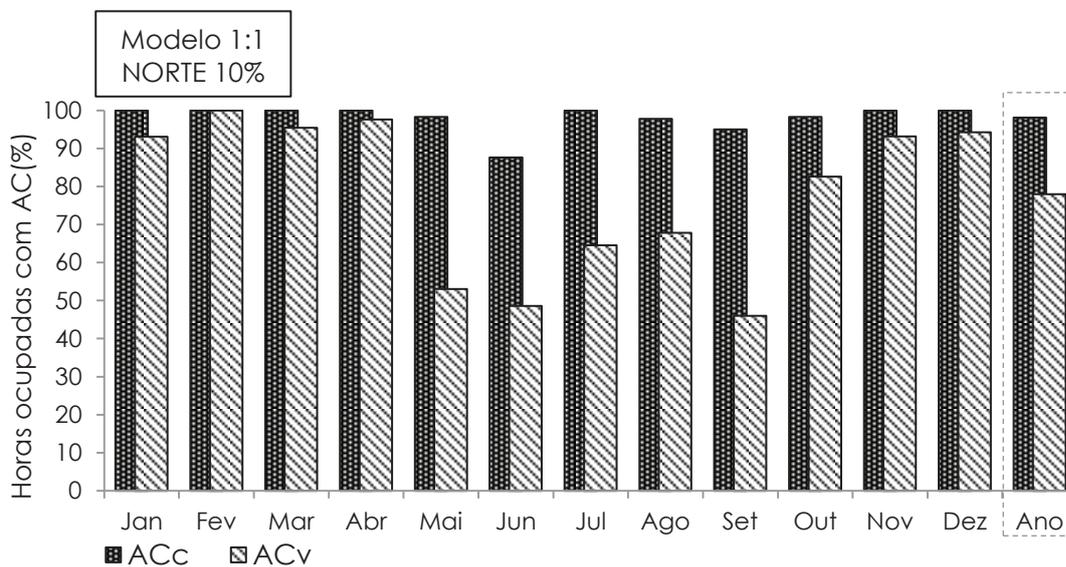


Figura 38 - Redução do uso do ar condicionado no modo misto comparado com o ar condicionado constante do Modelo 1:1, PAF 10%, orientação norte

Verifica-se que no mês de fevereiro não ocorre a diminuição do tempo em que o ar condicionado é ligado, operando o mesmo o tempo inteiro tanto no caso ACc como no caso ACv. O acionamento do ar condicionado é maior para o PAF de 10% devido à área limitada disponível para o uso da ventilação natural. Com

uma janela pequena a temperatura interna torna-se mais elevada, já que o ambiente interno não se beneficia de uma ventilação eficiente, sendo necessário um tempo maior com ar condicionado no ambiente. Esse fato também pode ser observado na Figura 39.

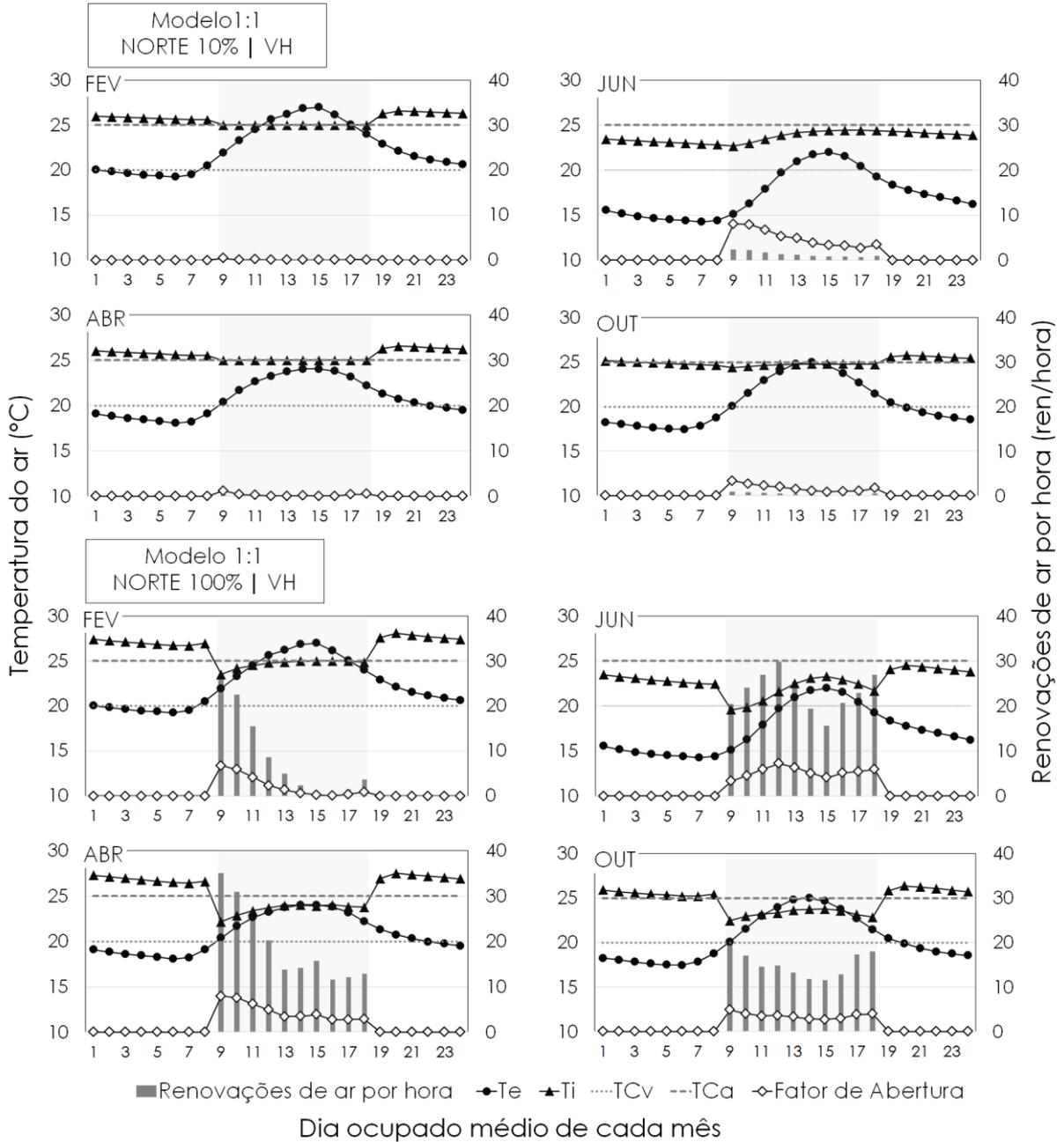


Figura 39 - Representação de um dia médio ocupado para um mês de cada estação do Modelo 1:1, PAF's 10 e 100%, orientação norte

Na Figura 39, os dois extremos de PAF's (10 e 100%) foram selecionados para exemplificar que, conforme se aumenta o PAF, as renovações de ar no ambiente interno aumentam, o que faz com que as temperaturas internas sejam menores,

não atingindo a temperatura de controle do ar condicionado e favorecendo o uso da ventilação natural. Verificou-se um mesmo padrão no comportamento do fator de abertura da janela entre os PAF's de 40, 70 e 100%, ocorrendo um aumento pequeno, conforme se aumenta o PAF, do fator de abertura, controlado a partir de relações com o ambiente interno e externo. Apesar desse fato, destaca-se que o aumento das renovações de ar por hora, devido à maior eficácia da ventilação com uma área de abertura maior, não causou uma grande redução das temperaturas médias internas. O PAF de 10% destoa-se novamente desse conjunto, apresentando baixíssimos fatores de abertura assim como uma pequena renovação de ar por hora nos meses de verão, inverno, primavera e outono.

Por fim, com a alteração da orientação (sul, leste e oeste) foi possível observar o mesmo padrão se repetindo em relação à orientação norte. A fachada norte possui um maior tempo em que é utilizado o ar condicionado tanto para o caso ACc, como para o caso VH, sendo mais evidente para a menor área envidraçada (PAF de 10%). A orientação sul apresenta um acionamento do mesmo um pouco menor nos dois casos e a orientação leste e oeste possuem um comportamento muito próximo, conforme exemplifica a Figura 40 com os PAF's de 10 e 100%.

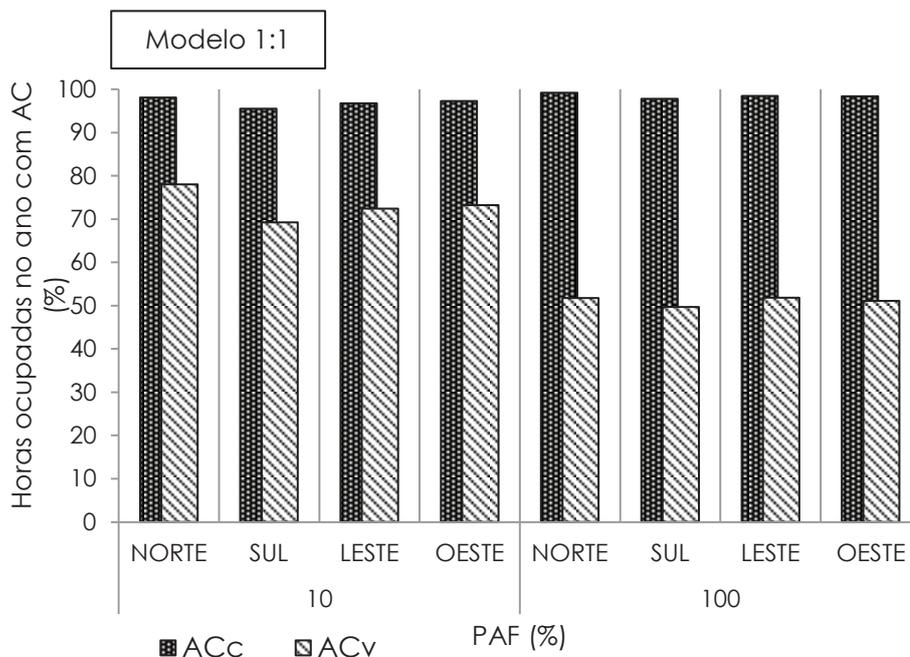


Figura 40 - Redução do uso do ar condicionado no modo misto comparado com o ar condicionado constante do Modelo 1:1, PAF's 10 e 100%, todas as orientações

A variação relativa ao longo do ano se repete, mesmo com a alteração da orientação, com os PAF's de 70 e 100% com o mesmo padrão visto para o PAF de 40% e orientação norte, e com uma maior quantidade de horas de acionamento do ar condicionado, o PAF de 10%. A ventilação natural no caso VH também acompanha os padrões já observados, complementando o período em que não há o uso do ar condicionado, permanecendo poucas horas sem ambos os sistemas em todas as orientações. Também é observada a maior abertura da janela até a metade do período (8 às 13 horas).

As fachadas com PAF's de 40, 70 e 100% possuem pequenas diferenças em relação às renovações do ar do ambiente e fatores de abertura muito semelhantes, destoando-se desse conjunto o PAF de 10%, que apresenta uma alteração no padrão do fator de abertura e menores renovações de ar por hora. A Figura 41 indica essas semelhanças e diferenças para o mês de junho para os PAF's de 10 e 100% em todas as orientações. Verifica-se um comportamento semelhante das renovações de ar entre as fachadas norte e leste, assim como entre as fachadas sul e oeste, tanto para o modelo com PAF de 10%, como de 100%.

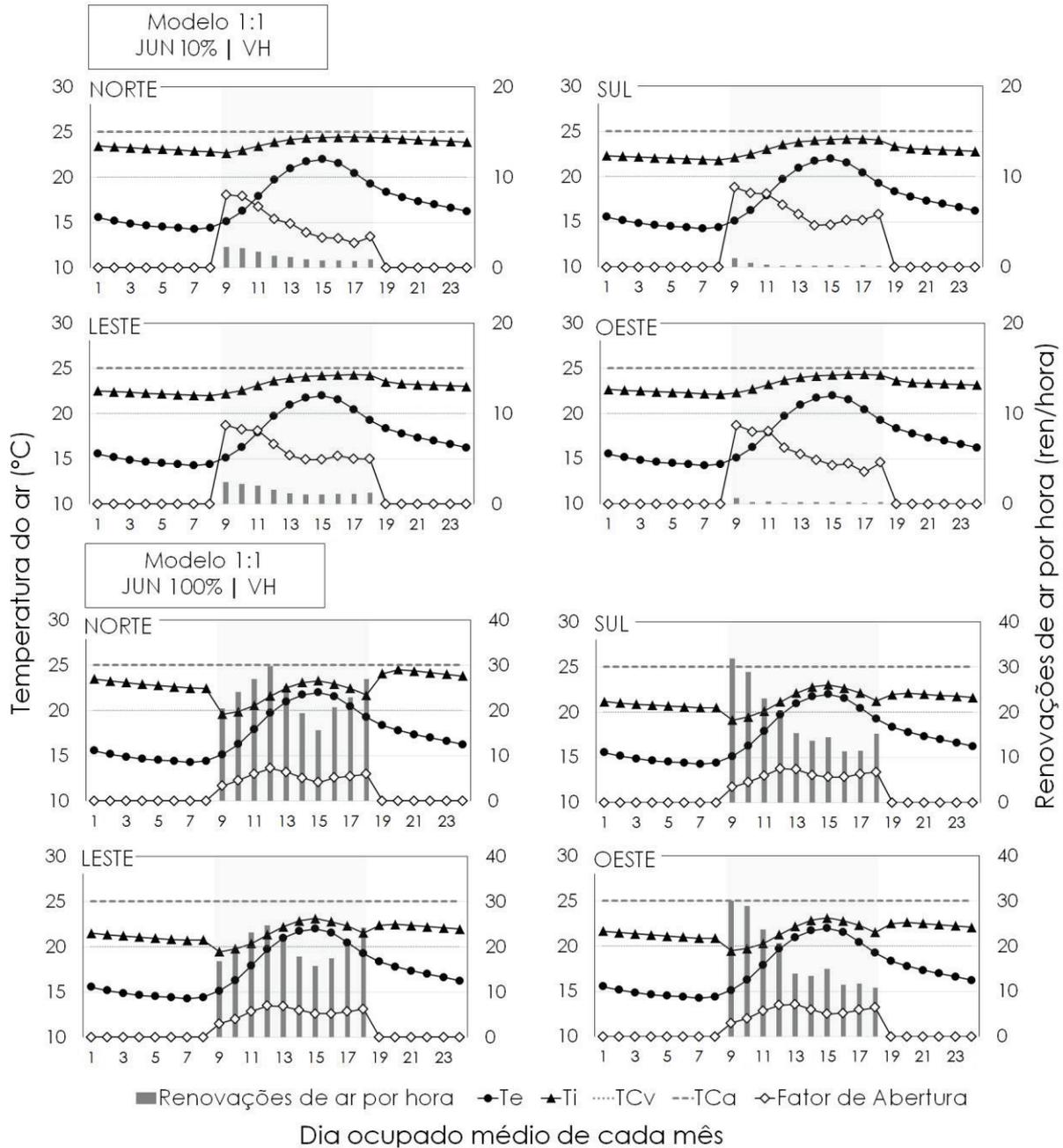


Figura 41 - Representação de um dia médio ocupado para o mês de junho do Modelo 1:1, PAF's 10 e 100%, todas as orientações

c) Modelos 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1

Em relação ao padrão de funcionamento dos casos com ventilação híbrida e ar condicionado constante, ao se alterar a geometria dos modelos, pode ser observada a Figura 42. As salas mais profundas (1:2 e 1:3) apresentaram o acionamento do ar condicionado para ambos os casos, ACc e VH (ACv), maior do que a sala quadrada (1:1), sendo a sala mais profunda, 1:3, com uma maior quantidade de horas em que o mesmo é utilizado, do que a sala 1:2. As salas mais

largas (2:1 e 3:1) apresentaram maior redução do tempo em que é usado o ar condicionado, nos dois casos.

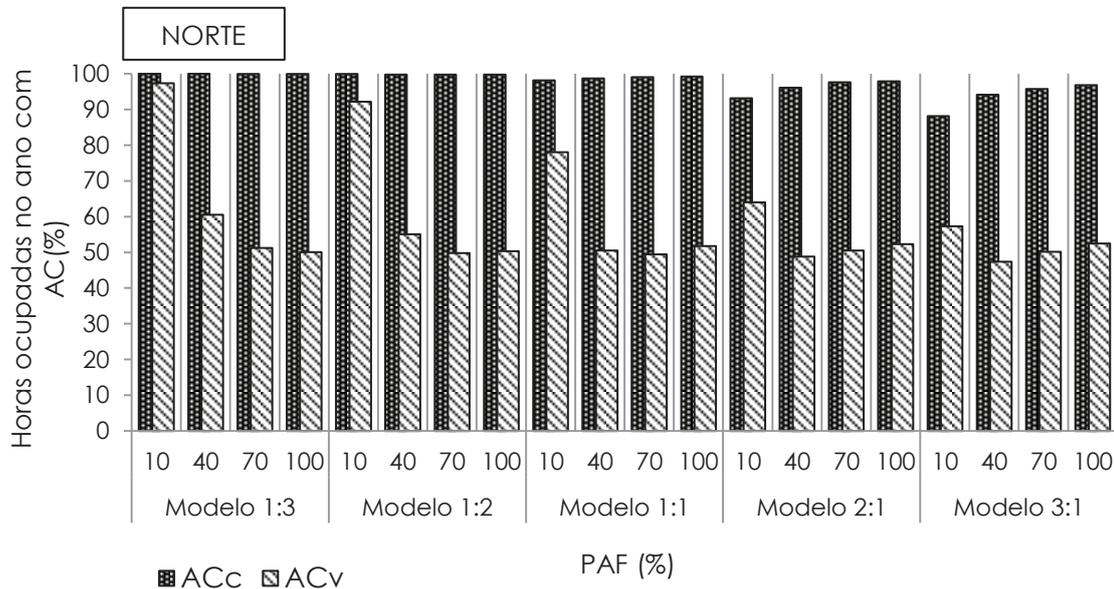


Figura 42 - Redução do uso do ar condicionado no modo misto comparado com o ar condicionado constante dos Modelos 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1, todos os PAF's e orientação norte

Também se observa uma diminuição do acionamento do ar condicionado no caso VH (ACv) para as salas mais profundas (1:3 e 1:2) conforme se aumenta a área de abertura na fachada (a partir do PAF de 40%). E para as salas mais largas ocorre o inverso, ao se aumentar a área envidraçada há um aumento de horas em que o ar condicionado é acionado. Isso ocorre porque nas salas mais largas a área da janela é maior que nas salas mais profundas. Com janelas maiores e uma menor profundidade, as salas mais largas recebem um maior ganho solar pelo vidro o que faz com ocorra um aumento do ganho de calor no ambiente, sendo necessário se acionar o ar condicionado mais vezes (ver item 4.3).

A menor quantidade de horas em que as janelas são abertas no caso VH mostraram-se para o Modelo 1:3, com o PAF de 10%, orientações leste e oeste, conforme mostra a Figura 43.

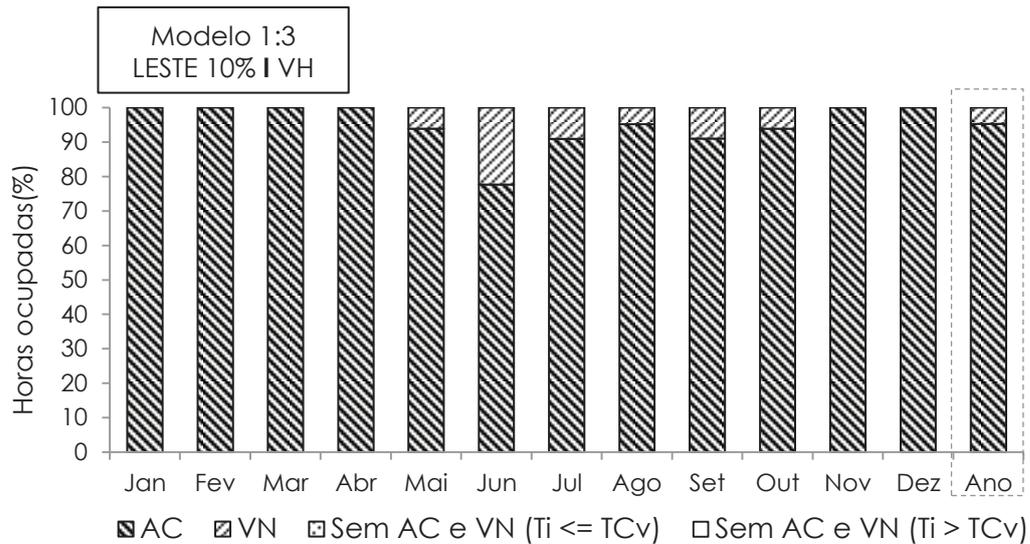


Figura 43 - Uso da ventilação natural e do ar condicionado do Modelo 1:3, PAF 10%, orientação leste

Isso ocorreu devido à sala ser muito profunda e a janela muito pequena, impedindo que a ventilação natural consiga agir de forma eficaz, diminuindo-se sua influência na temperatura interna do ambiente, fazendo com que o ar condicionado tenha que ser utilizado mais vezes. O maior aproveitamento da ventilação natural foi observado, portanto, nas saletas de geometria 3:1, 2:1 e 1:1, respectivamente, com padrões semelhantes, destacando-se a maior quantidade de horas em que há a abertura das janelas a sala 3:1. As renovações de ar por hora para as geometrias 1:1, 2:1 e 3:1 foram maiores que as salas mais estreitas (1:2 e 1:3), minimizando-se a diferença entre as temperaturas internas e externas, conforme exemplifica a Figura 44.

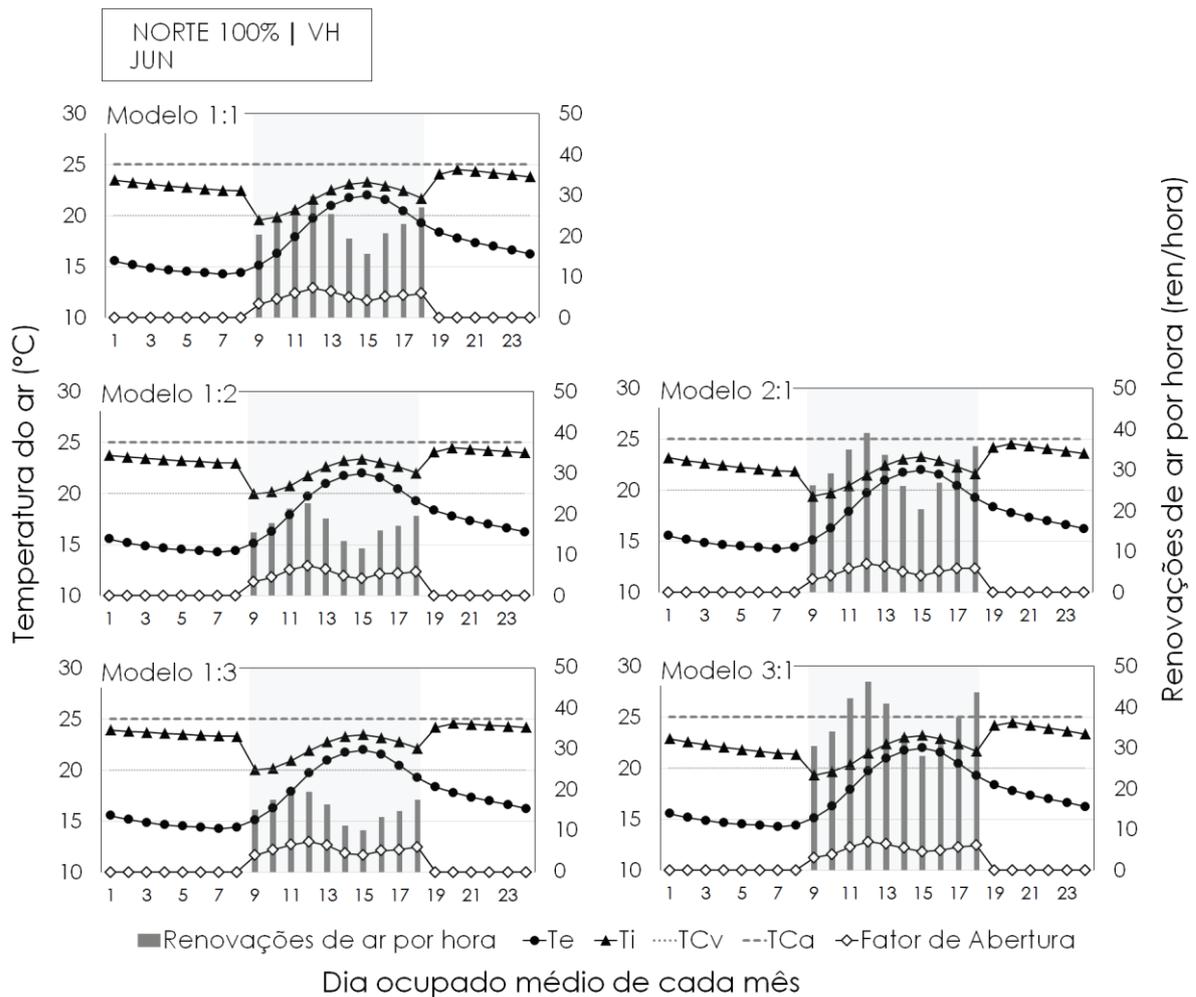


Figura 44 - Representação de um dia médio ocupado para o mês de junho para todos os Modelos, PAF 100%, orientação norte

4.3 Ganhos e perdas de calor

O ambiente interno troca energia com o exterior ao longo do tempo, desta forma foram observadas as trocas térmicas que ocorrem entre a saleta comercial e o ambiente externo e quais são os principais fatores que contribuem para os ganhos e as perdas de calor.

a) Modelo 1:1, PAF 40% e orientação norte

As Figuras 45 e 46 apresentam os ganhos e as perdas de calor do dia médio ocupado anual da saleta comercial, Modelo 1:1, PAF de 40% e orientação norte, com o uso do ar condicionado constante (ACc) e com o uso do modo misto (VH), respectivamente. Nos dois casos são observados que os ganhos internos, representados pelos equipamentos e pela ocupação, contribuem para o ganho de calor no ambiente, porém, durante o dia, o maior contribuinte é o vidro, devido aos

altos ganhos solares provindos das superfícies envidraçadas. Já o ar condicionado, a ventilação natural e a envoltória são responsáveis pela perda de calor no período diurno. A iluminação artificial (IA) apresenta um ganho de calor muito pequeno, devido ao sistema escolhido na pesquisa ser dimerizável e energeticamente eficiente, com uma potência instalada nível A, de acordo com as diretrizes do RTQ-C (INMETRO, 2014).

A envoltória fica responsável pelo ganho de calor fora do período ocupado, devido ao fenômeno de inércia térmica. O contrário ocorre com o vidro, que recebe o calor e transmite para o ambiente interno ao longo do período ocupado, perdendo calor fora desse período. A diferença entre os casos ACc e VH está na retirada do calor ao longo do período ocupado. No primeiro caso, o ar condicionado é o único responsável por retirar o calor juntamente com a envoltória, sendo que no segundo caso essa retirada de calor é dividida, além da envoltória, entre o ar condicionado e a ventilação natural, permitindo também a renovação do ar no ambiente.

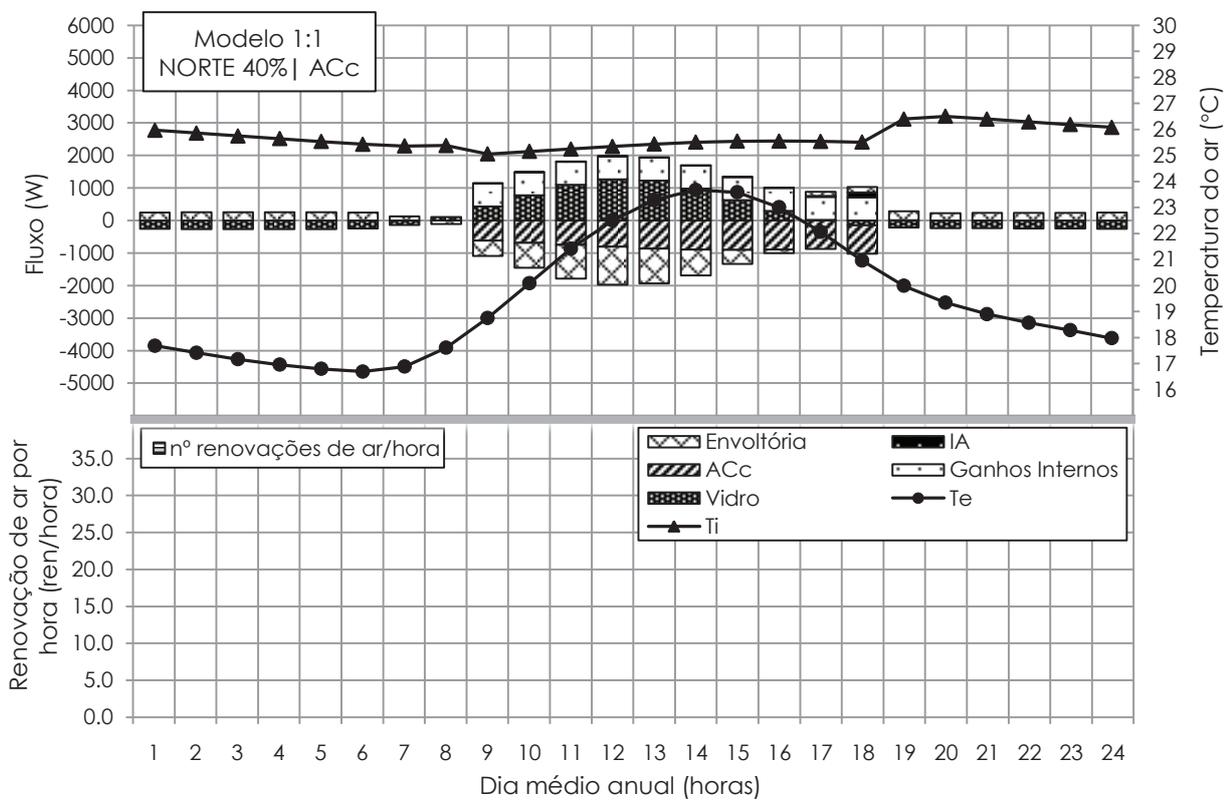


Figura 45 - Ganhos e perdas de calor para a saleta comercial com uso do ar condicionado constante (ACc) para uma variação no Modelo 1:1

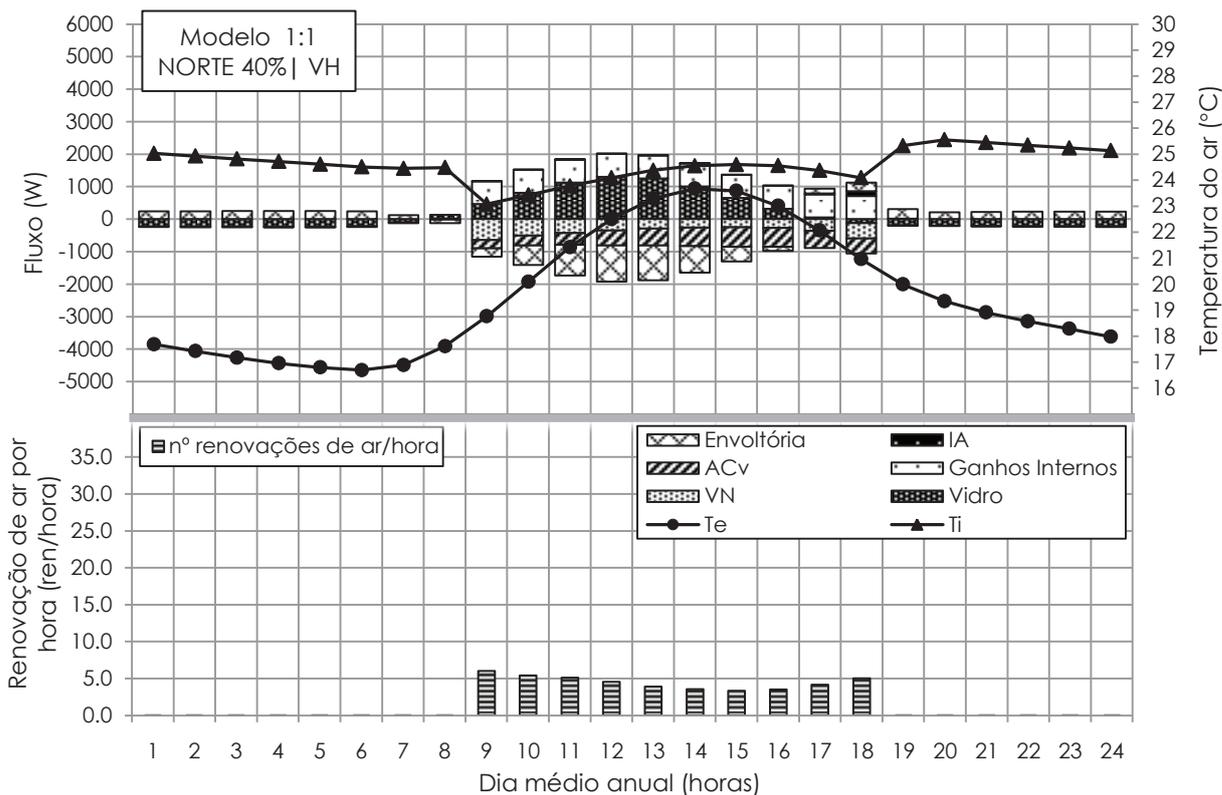


Figura 46 - Ganhos e perdas de calor para a saleta comercial com o uso da ventilação híbrida (VH) para uma variação no Modelo 1:1

b) Modelo 1:1, todos os PAF's e orientação norte

Para se observar os ganhos e as perdas de calor dos quatro PAF's simultaneamente, de 10, 40, 70 e 100% na orientação norte, os ganhos e as perdas totais anuais foram obtidos para cada parâmetro (ganhos internos, vidro, iluminação artificial, envoltória, ar condicionado e ventilação) e apresentados na Figura 47, que se refere à saleta comercial, com o uso do ar condicionado constante (ACc) e com o uso do modo misto (VH). Na Figura 47 também são apresentados os mesmos gráficos, apenas com os parâmetros mais pertinentes e com os valores em módulo, para auxiliar no processo de análise dos fenômenos que ocorrem no ambiente.

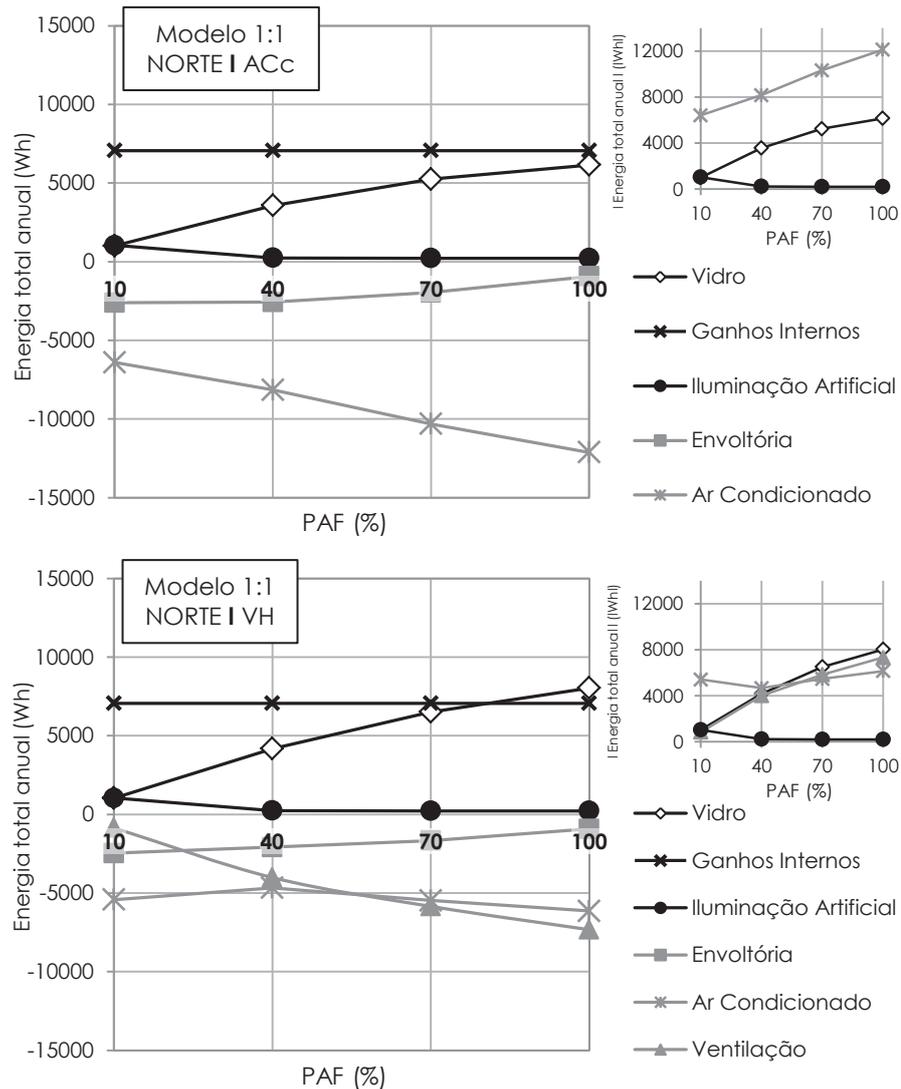


Figura 47 - Somatória dos ganhos e perdas de calor anuais em relação a cada parâmetro dos casos ACc e VH do Modelo 1:1, todos os PAF's, orientação norte

Verifica-se nos dois casos que, conforme se aumenta o PAF os ganhos internos permanecem fornecendo o mesmo ganho de calor para o ambiente (devido ao fato de serem definidos iguais na simulação) e o ganho de calor pela iluminação artificial é reduzido a partir do PAF de 40%, apesar de já ter uma contribuição bem pequena, devido ao maior uso da iluminação natural. Nos dois casos, há um aumento significativo do ganho de calor pelo vidro, conforme se aumenta o PAF. Esse ganho de calor pelo vidro representa o balanço entre o ganho solar durante o dia e a perda desse calor durante a noite. Isso indica que o ganho de calor pelo vidro é bem maior que a perda, devido ao fato da área envidraçada ser uma superfície transparente e de pequena espessura. Conclui-se que, os ganhos solares são os fatores mais impactantes ao se aumentar a área envidraçada.

Na retirada de calor desse ambiente, a envoltória opaca tem uma redução em sua eficácia na perda de calor com o aumento do PAF, devido à diminuição da sua área.

Para a sala com o uso do ar condicionado de forma constante (ACc) a maior retirada de calor é devido a este equipamento. Conforme se aumenta o PAF e, conseqüentemente, os ganhos solares pelas superfícies envidraçadas, a retirada pelo ar condicionado desse elevado ganho de calor passa a ser maior, com uma tendência de aumento praticamente linear para atingir o equilíbrio térmico do ambiente.

No caso VH é realizada a retirada do calor também pela abertura na fachada com a ventilação natural, o que faz com que a retirada de calor pelo ar condicionado (ACv) seja menor em comparação com o caso ACc, devido ao fato de ter sido dividida essa função. Assim, conforme se aumenta o PAF, a retirada de calor pela ventilação natural aumenta de forma significativa, com uma tendência a linearidade, mas a retirada de calor pelo ar condicionado não segue a mesma tendência, devido ao elevado ganho solar. Observa-se que a redução da retirada de calor com o ar condicionado no modo misto (ACv) atinge um ponto mínimo para o PAF de 40%, tendo os PAF's de 10 e 70% valores próximos, com o PAF de 100% com uma retirada de calor maior que todos os outros. Esse ponto ótimo é atingido com o PAF de 40%, para esse Modelo 1:1, devido ao fato da área envidraçada não ser tão grande a ponto de ter um elevado ganho solar (comparada aos PAF's de 70 e 100%) e também não ser tão pequena a ponto de não promover uma ventilação natural eficaz (comparada ao PAF de 10%), tendo um equilíbrio entre esses dois fatores, permitindo que a retirada de calor pelo ar condicionado seja menor. Verifica-se também um ganho de calor pelo vidro um pouco maior no modo VH em relação ao modo ACc, mostrando uma interferência da ventilação natural no ganho de calor pelo vidro.

c) Modelo 1:1, todos os PAF's e todas orientações

Com a alteração da orientação dos modelos, a influência dessa mudança pode ser observada na Figura 48, que compara a somatória dos ganhos e das perdas em módulo tanto para o caso ACc como para o caso VH.

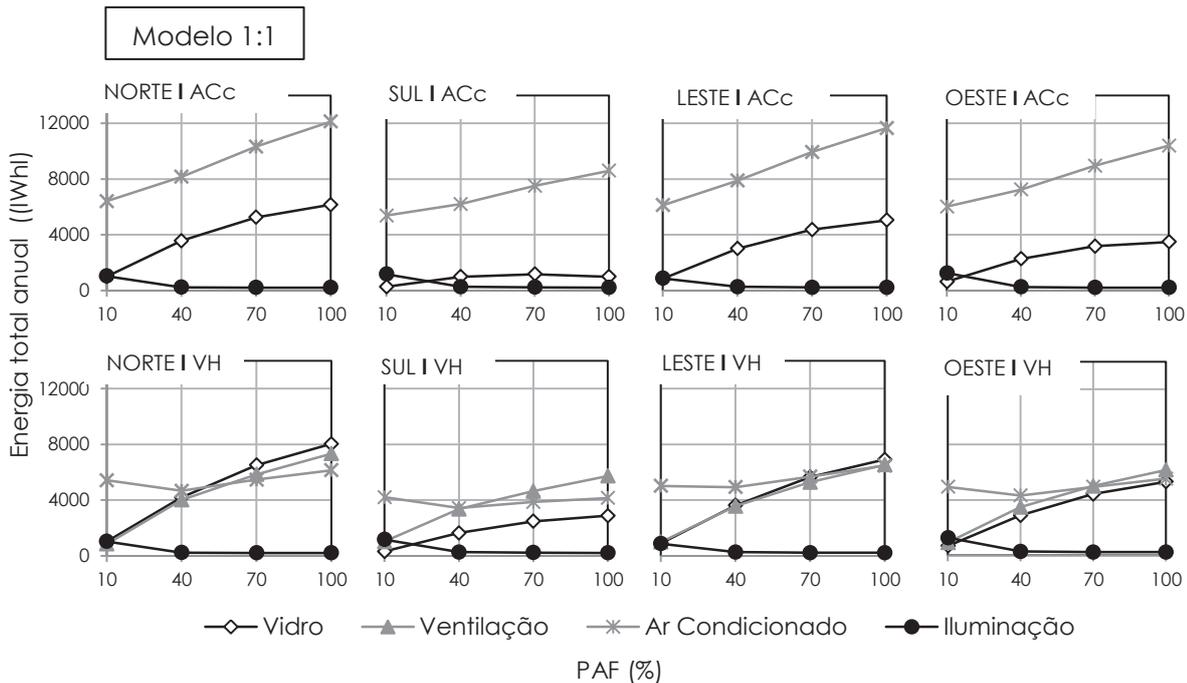


Figura 48 - Somatória dos ganhos e perdas de calor em relação a cada parâmetro dos casos ACc e VH do Modelo 1:1, todos os PAF's e todas as orientações

A área envidraçada na orientação sul recebe uma menor radiação solar pelo vidro do que se a mesma estivesse na fachada norte nos dois casos (ACc e VH), devido ao fato da cidade de São Paulo estar no hemisfério sul, recebendo uma menor radiação. A fachada leste e oeste possuem um comportamento semelhante, contudo, curiosamente a área envidraçada da fachada leste tem um maior ganho de calor do que a fachada oeste, fato exemplificado através das Figuras 49 e 50, respectivamente, para o caso com VH e PAF de 70%. Apesar de esse fato ocorrer, verifica-se que o ganho de calor na fachada leste encontra-se no período da manhã, enquanto que na fachada oeste é encontrado no período da tarde, comportamento esperado devido ao movimento do sol, sendo que isso pode ter acontecido devido a períodos de nebulosidade durante a tarde. Contudo, observa-se que a alteração da orientação conforme se aumentam os PAF's na Figura 48, não influenciou a retirada de calor pelo ar condicionado e pela ventilação natural ao ponto de se modificar a curva, tendo elas um comportamento próximo ao da fachada norte.

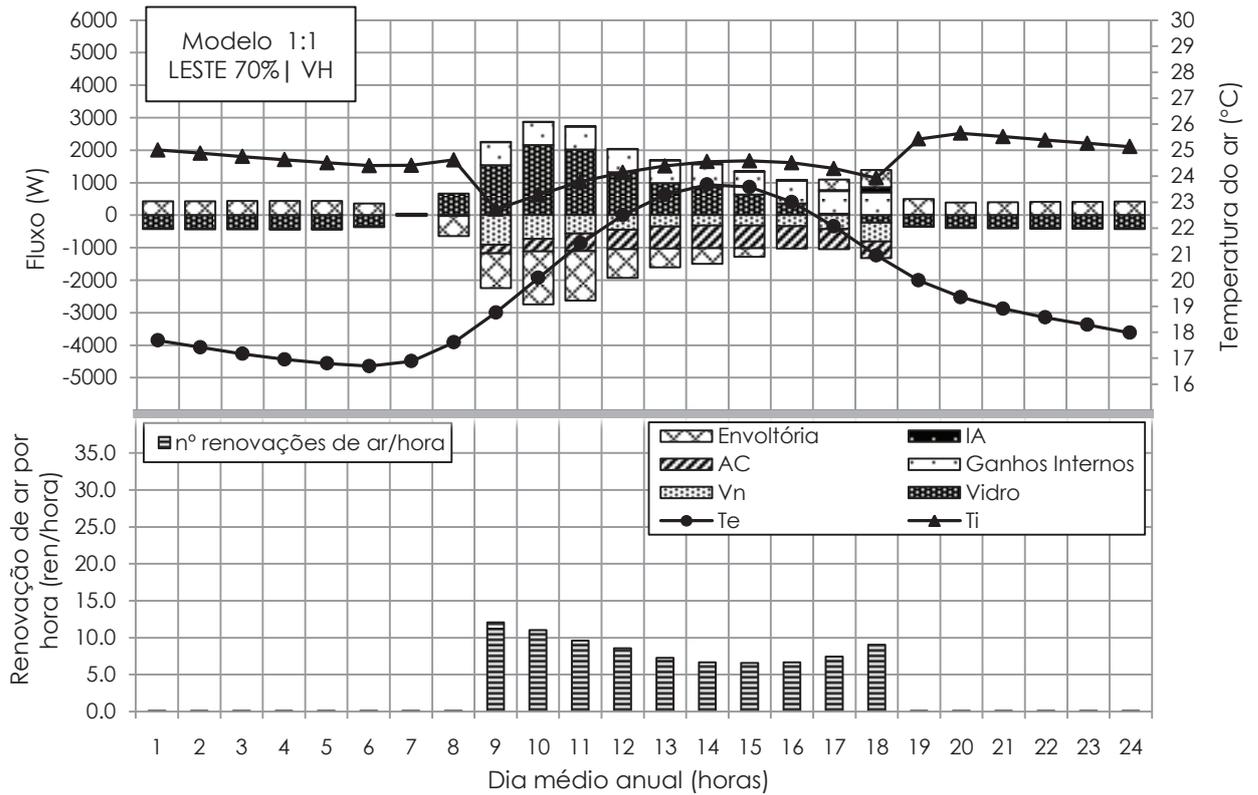


Figura 49 - Ganhos e perdas de calor para a saleta comercial com uso ventilação híbrida (VH) do Modelo 1:1, PAF de 70%, orientação leste

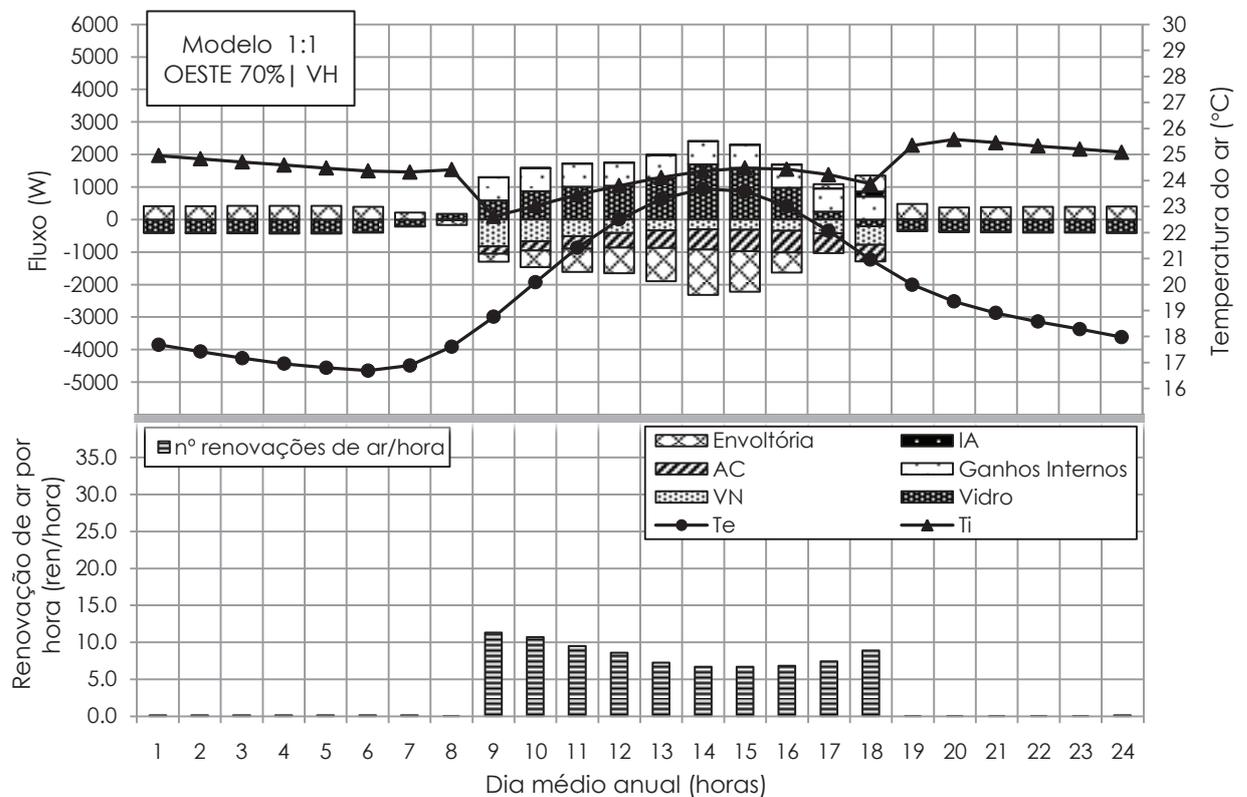


Figura 50 - Ganhos e perdas de calor para a saleta comercial com uso ventilação híbrida (VH) do Modelo 1:1, PAF de 70%, orientação oeste

d) Modelos 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1

Em relação às diferenças entre os ganhos e as perdas de calor para as diferentes geometrias das saletas comerciais, é necessário se observar a Figura 51, com maior detalhe para o caso VH, orientação norte e todos os PAF's.

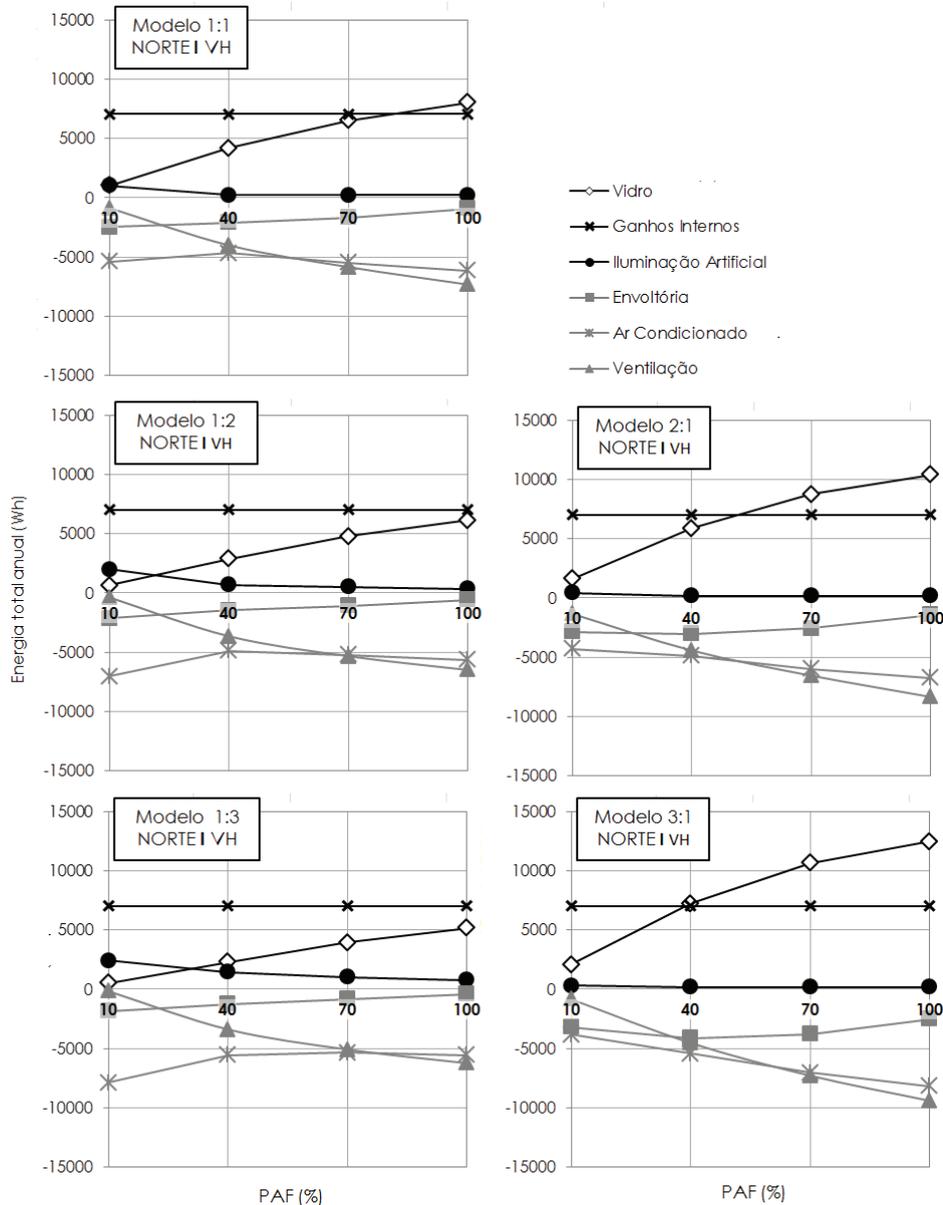


Figura 51 - Somatória dos ganhos e perdas de calor em relação a cada parâmetro do caso VH de todos os Modelos, todos os PAF's e orientação norte

Observa-se que conforme se aumenta a profundidade da sala (1:2 e 1:3) os ganhos solares passam a ser menores, porque a área envidraçada é menor nessa fachada do que para as salas mais largas (2:1 e 3:1). As salas mais largas possuem áreas envidraçadas maiores, o que faz com que o ganho solar pelo vidro seja

maior. Devido ao fato dos ganhos solares pelo vidro terem a maior influência no ganho de calor nesses ambientes, ao se aumentar a área de abertura na fachada isso se refletirá não só na retirada de calor do ar condicionado (ACv) no caso VH, como também na retirada de calor pela ventilação natural (VN). Verifica-se que as curvas de retirada de calor tanto da ventilação como do ar condicionado neste caso híbrido se modificam ao se alterar a geometria, devido ao aumento ou diminuição, principalmente, dos ganhos solares, sendo as maiores diferenças entre os Modelos 1:1, 1:2, 1:3 e entre os Modelos 2:1 e 3:1. Em algumas variações pode acontecer da ventilação natural não conseguir remover o calor em excesso, não sendo eficiente a ponto de diminuir a retirada de calor pelo ar condicionado. Na sala mais profunda analisada (1:3) observa-se que a partir do PAF de 40% a retirada de calor com a ventilação natural permanece praticamente de forma linear, não ultrapassando a retirada de calor com o ar condicionado, que aumenta para atingir o equilíbrio térmico do ambiente. Por outro lado, nas salas mais largas (3:1 e 2:1) com o maior ganho de calor pelo vidro, mesmo com uma ventilação mais efetiva que nos outros modelos, ela não consegue ser suficiente a ponto de reduzir a retirada de calor do ar condicionado conforme se aumenta o PAF. Desta forma, o maior equilíbrio de ganhos e perdas de calor encontra-se para a sala quadrada, Modelo 1:1, limitando-se um elevado ganho solar pelo vidro em relação às salas mais largas, Modelos 2:1 e 3:1, porém com uma retirada de calor maior pela ventilação natural do que as salas mais profundas, Modelos 1:2 e 1:3.

4.4 Consumo de energia versus conforto visual

a) Modelo 1:1, PAF 40% e orientação norte

Como já observado anteriormente, na análise do padrão de funcionamento (ver item 4.2) o sistema híbrido apresenta uma menor quantidade de horas em que o ar condicionado é acionado, devido à alternância desse sistema com a ventilação natural. Consequentemente, isso gera uma redução no consumo energético do ar condicionado quando comparamos com um ambiente em que ele funcione de forma constante. A Figura 52 apresenta essa redução do consumo ao longo dos meses, com a adoção do modo misto para o Modelo 1:1, PAF 40% e orientação norte. As maiores reduções são observadas nos meses mais frios, devido ao maior uso da ventilação natural nesse período, como já foi visto anteriormente.

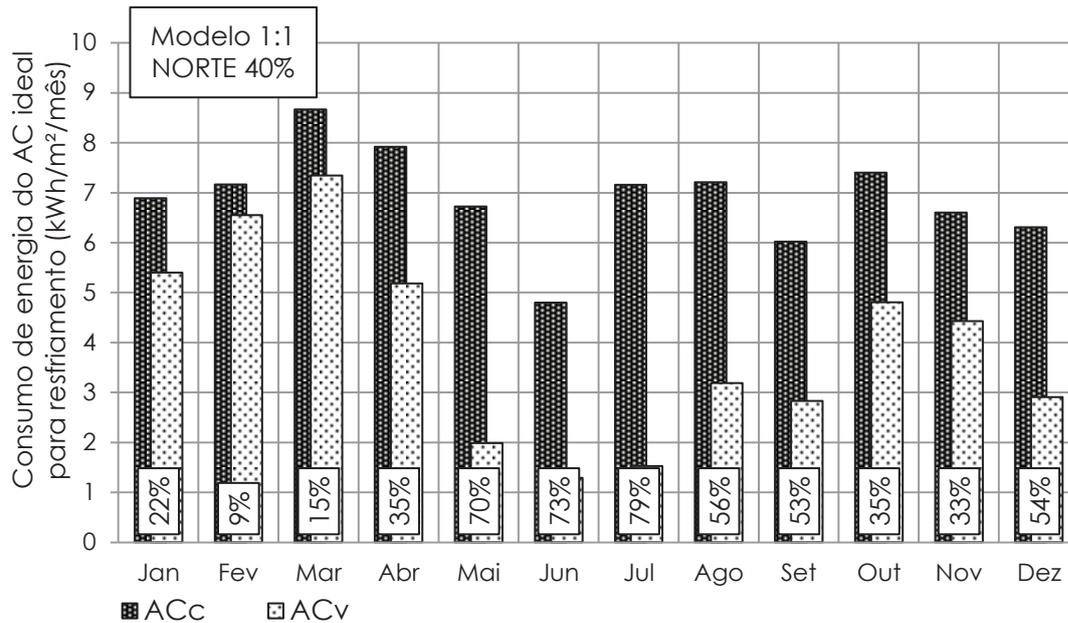


Figura 52 - Redução do consumo do ar condicionado com a ventilação híbrida para uma variação do Modelo 1:1

A Tabela 19 apresenta essa redução do consumo anual do ar condicionado, que é igual a 42,7%. Caso fosse considerado um ar condicionado diferente do ideal, os valores de consumos seriam diferentes, mas a relação da redução do consumo seria mantida entre o consumo do ar condicionado ACc e ACv.

Neste modelo, como já foi observado no padrão de funcionamento (ver item 4.2) não houve horas em que fosse necessário ligar o ar condicionado para aquecimento, conseqüentemente não houve consumo, em ambos os casos.

Tabela 19 - Redução do consumo do ar condicionado com o modo misto para uma variação do Modelo 1:1

Consumo de energia do AC ideal (kWh/m²/ano)						
Modelo 1:1		ACc		ACv		Redução (%)
		Resfriamento	Aquecimento	Resfriamento	Aquecimento	
Orientação	PAF	82,7	0,0	47,3	0,0	42,7%
Norte	40%					

A Tabela 20 apresenta todos os consumos energéticos por uso final dessa saleta comercial, Modelo 1:1, PAF 40% e orientação norte para os casos ACc e VH. O consumo energético dos equipamentos e da iluminação artificial são os mesmos para os dois casos (ACc e VH), iguais a 27,9 kWh/m²/ano e 2,4 kWh/m²/ano, respectivamente. Apenas para esse tipo de análise, onde o consumo do ar

condicionado é comparado com os consumos totais da sala comercial (com os equipamentos e iluminação artificial), o consumo do ar condicionado ideal foi convertido no equivalente ao do *Split*. Desta forma, a redução do consumo de energia elétrica total nesse ambiente, considerando a somatória da iluminação artificial (IA), equipamentos (EQ) e ar condicionado (ACc ou ACv) seria de 19,5 %.

Tabela 20 - Redução do consumo total com o modo misto para uma variação do Modelo 1:1

Consumo de energia total (kWh/m ² /ano)										
Modelo 1:1		ACc				VH				Redução Total (%)
Orientação	PAF	IA	EQ	ACc	Consumo Total	IA	EQ	ACv	Consumo Total	
Norte	40	2,4	27,9	25,5	55,8	2,4	27,9	14,6	44,9	19,5%

Através dessa análise, “transformando-se” o ar condicionado ideal em *Split*, verifica-se que os equipamentos passam a ser o consumo mais representativo do ambiente. O pequeno consumo da iluminação artificial é devido ao maior uso da iluminação natural, como já foi verificado no padrão de funcionamento (item 4.1). Neste caso o ambiente pode atingir elevadas iluminâncias devido ao tamanho da área envidraçada e sua orientação para o norte, gerando o risco de ofuscamento.

b) Modelo 1:1, todos os PAF's, orientação norte

Na Figura 53 e na Tabela 21 pode ser observada a comparação do consumo do ar condicionado nos casos ACc e VH (ACv), na saleta comercial de geometria 1:1, conforme se aumenta a área de abertura na fachada na orientação norte. Verificou-se um pequeno consumo para aquecimento do ambiente para o caso VH apenas com os PAF's de 70 e 100%, no entanto, esse valor é tão baixo que será considerado desprezível neste trabalho.

A Figura 53 também apresenta, além dos consumos do ar condicionado já apresentados anteriormente, um indicador de conforto visual. Este é representado pela porcentagem de horas durante o período ocupado em que um ponto da sala atinge o maior valor para esse parâmetro, em que o nível de iluminância ultrapassa 2000 lx, indicando o maior risco de ofuscamento no ambiente.

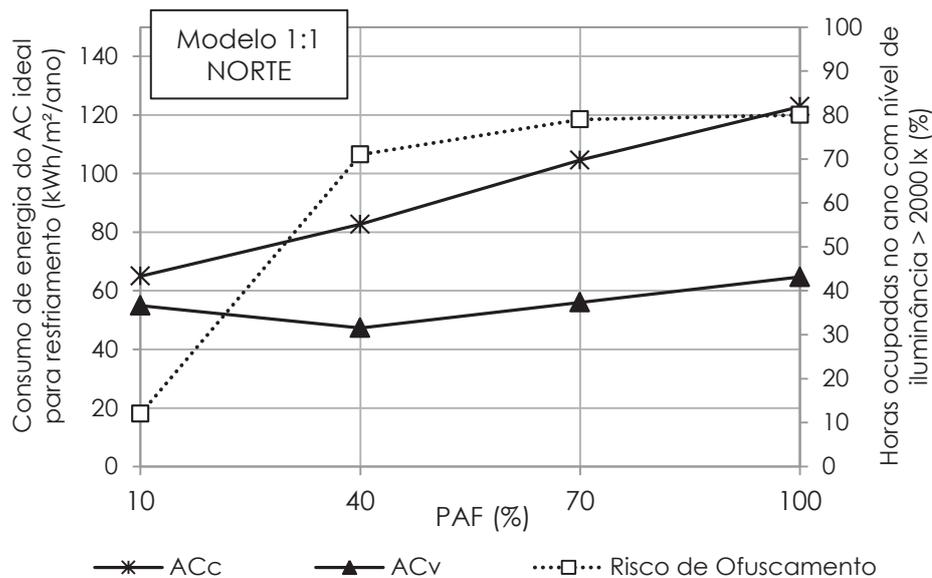


Figura 53 - Consumos de energia para o AC e risco de ofuscamento do Modelo 1:1, todos os PAF's, orientação norte

Tabela 21 - Redução do consumo do ar condicionado com o modo misto do Modelo 1:1, todos os PAF's, orientação norte

Consumo de energia do AC ideal (kWh/m²/ano)						
Modelo 1:1		ACc		ACv		Redução Total ACv - ACc (%)
		Resfriamento	Aquecimento	Resfriamento	Aquecimento	
NORTE	10	65,0	0,0	54,9	0,0	15,4%
	40	82,7	0,0	47,3(-13,8%) ⁸	0,0	42,7%
	70	104,6	0,0	56,1(+2,2%)	0,6	45,8%
	100	122,9	0,0	64,7(+15,3%)	2,4	45,3%

Assim como para o modelo com PAF de 40%, que já havia sido apresentada, a adoção do modo misto sempre significa um consumo energético menor para resfriamento. Essa redução, para os modelos de 70 e 100% é igual a 45,8 e 45,3%, respectivamente, muito próxima do já observado para o PAF de 40%, de 42,7%. Já para o PAF de 10%, essa diferença é bem menor, e igual a 15,4%, pois conforme já observado, devido à pequena abertura da janela a ventilação não chega a ser suficiente para propiciar uma perda significativa de calor, sendo o acionamento do ar condicionado no caso com a ventilação híbrida mais similar ao caso com ar condicionado constante.

⁸ Os percentuais representam a redução ou aumento referente ao consumo de resfriamento do ar condicionado no modo misto de acordo com cada PAF. Os PAF de 40 e 70% foram comparados com o PAF de 10% e o PAF de 100% com o PAF de 70%.

A partir da Figura 53 e da Tabela 21, observa-se que conforme se aumenta o PAF na fachada norte, o consumo do ar condicionado no caso ACc aumenta com tendência linear, enquanto que no caso com ACv, passa a ser menor e não segue essa padrão. No caso ACv o consumo do ar condicionado para resfriamento com o PAF de 10 e 70% são muito próximos (aumento de apenas 2,2%), enquanto que o consumo para o PAF de 40% é menor (redução de 13,8%), aumentando-se novamente para o PAF de 100% (aumento de 15,3%).

O PAF de 10% apresenta uma pequena área envidraçada, o que reduz o ganho de calor pelo vidro, porém há um maior consumo de energia devido ao ar condicionado, pois a ventilação natural não é eficaz, por causa da dimensão da abertura na fachada. Enquanto isso, os PAF's de 70 e 100% apresentam uma área envidraçada maior, o que representa um maior ganho de calor para o ambiente, e mesmo com uma maior abertura para a ventilação, ela não é suficiente para retirar todo o calor a ponto de se obter uma maior redução do consumo do ar condicionado.

Apesar dos casos com PAF's de 40, 70 e 100% apresentarem uma quantidade de horas muito semelhante em que o ar condicionado é acionado, visto no padrão de funcionamento (ver item 4.2), o mesmo tem que trabalhar mais no ambiente com o PAF maior, devido ao maior ganho solar pela área da abertura, discutido anteriormente (ver item 4.3), o que faz com que seu consumo de energia também aumente.

Mesmo com o PAF de 40% apresentando uma relação maior de equilíbrio, com um ponto de mínimo de consumo de ar condicionado para o caso VH, existe a questão do risco de ofuscamento devido ao tamanho da área envidraçada. Em relação a esse parâmetro, através da Figura 53, verifica-se uma diferença maior entre o PAF de 10%, com o risco máximo de 12% e os PAF's de 40, 70 e 100%, com risco máximo de 70, 79 e 80%, respectivamente. Esses maiores riscos podem causar um desconforto visual, principalmente para pessoas que estarão em um ambiente de trabalho próximo à janela. O aumento da área envidraçada apesar de fornecer uma maior iluminação natural no ambiente, como já foi verificado no item padrão de funcionamento (ver item 4.1), pode prejudicar ao fornecer uma iluminação com um nível de iluminância muito elevado, gerando o risco de ofuscamento.

As comparações entre os consumos do ar condicionado (convertidos em *Split*) com os equipamentos e a iluminação artificial podem ser observadas na Figura 54.

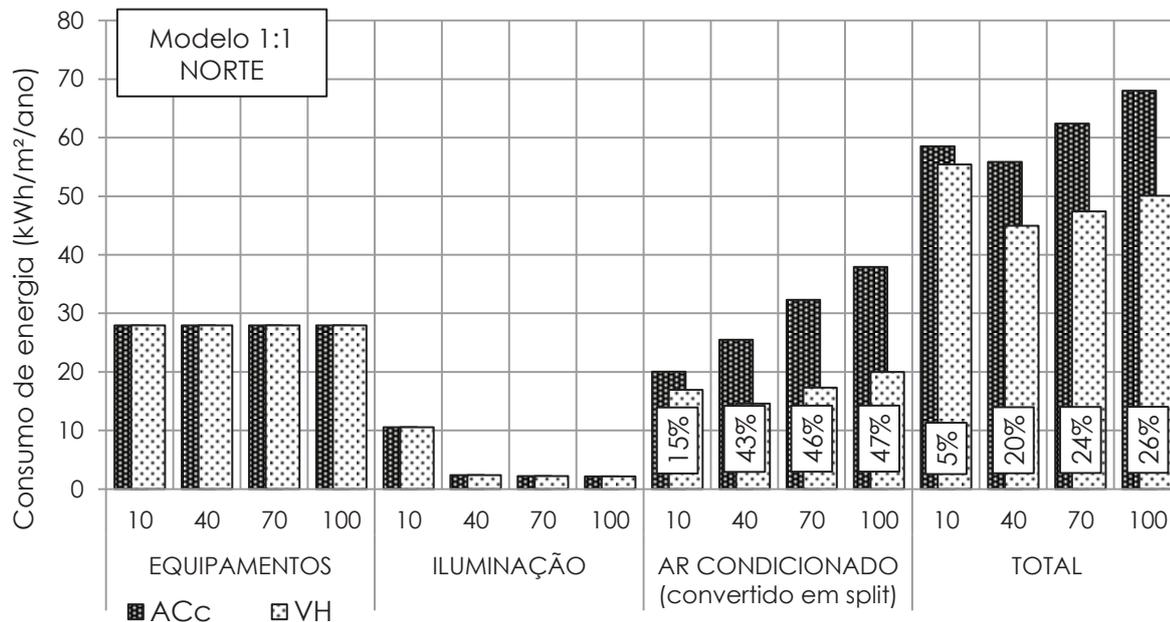


Figura 54 - Comparação do consumo dos equipamentos, iluminação e ar condicionado (convertido em *split*) do Modelo 1:1, todos os PAF's, orientação norte

Ao compararmos o consumo do ar condicionado tanto para o caso ACc como para o caso com VH, com o consumo dos equipamentos e da iluminação artificial, os equipamentos continuam representando um grande consumo energético nesse ambiente, como já observados nos casos com o PAF de 40%. A iluminação artificial apresenta um maior consumo apenas para o PAF de 10%, influenciando na redução do consumo total, distanciando-se do padrão observado para os outros PAF's. Com os PAF's de 40, 70 e 100%, a redução do consumo do ar condicionado no modo misto tem maior influência na redução do consumo total do ambiente, que se situa na média de 23%.

c) Modelo 1:1, todos os PAF's e todas as orientações

A redução do consumo do ar condicionado no caso VH (ACv) e no caso ACc para as diferentes orientações apresentam um comportamento semelhante à fachada norte, contudo com menores consumos e também menores riscos de ofuscamento, conforme mostram as Figuras 55 e 56.

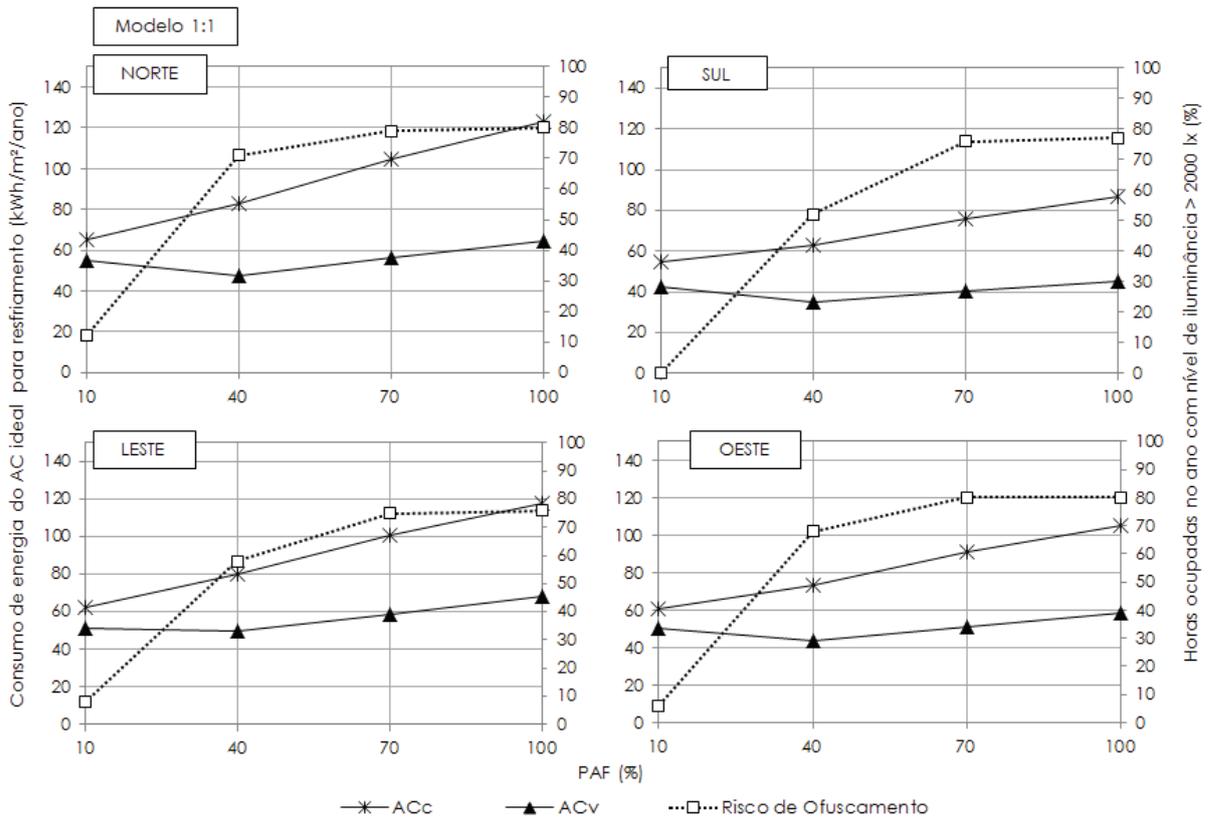


Figura 55 - Consumos de energia para o AC ideal e risco de ofuscamento do Modelo 1:1, todos os PAF's e todas as orientações

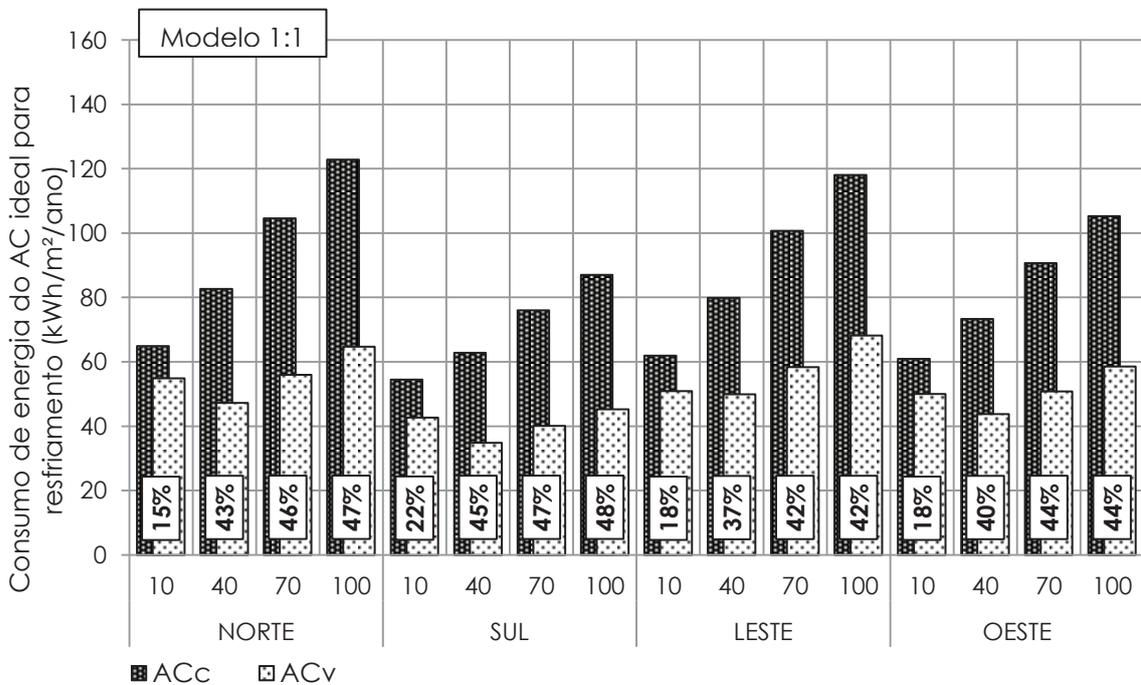


Figura 56 - Redução do consumo do ar condicionado com a ventilação híbrida do Modelo 1:1, todos os PAF's e todas as orientações

Observa-se que mesmo com a alteração da orientação o PAF de 40% continua sendo um ponto mínimo de consumo, sendo que na orientação sul possui o menor risco de ofuscamento se comparado às outras orientações, embora este ainda seja alto, em torno de 55% para o ponto próximo à janela. O menor consumo também pode ser observado a partir da Tabela 22, para cada orientação.

Tabela 22 - Redução do consumo do ar condicionado com o modo misto do Modelo 1:1, todos os PAF's e orientações

Consumo de energia do AC ideal (kWh/m ² /ano)						
Modelo 1:1		AC (constante)		VH		Redução Total VH - AC (%)
		Resfriamento	Aquecimento	Resfriamento	Aquecimento	
NORTE	10	65,0	0,0	54,9 (+16,1%) ⁹	0,0	15,4%
	40	82,7	0,0	47,3	0,0	42,7%
	70	104,6	0,0	56,1 (+18,6%)	0,6	45,8%
	100	122,9	0,0	64,7 (+36,8%)	2,4	45,3%
SUL	10	54,5	0,0	42,7 (+22,3%)	0,0	21,7%
	40	62,9	0,0	34,9	0,0	44,5%
	70	76,1	0,0	40,2 (+15,2%)	1,0	45,9%
	100	87,1	0,0	45,3 (+29,8%)	3,2	44,3%
LESTE	10	62,0	0,0	51,0 (+2%)	0,0	17,8%
	40	80,0	0,0	50,0	0,0	37,4%
	70	100,7	0,0	58,4 (+16,8%)	0,7	41,3%
	100	118,1	0,0	68,2 (+36,4%)	2,5	40,1%
OESTE	10	61,0	0,0	50,1 (+14,1%)	0,0	17,9%
	40	73,4	0,0	43,9	0,0	40,2%
	70	90,8	0,0	50,9 (+15,9%)	0,7	43,2%
	100	105,4	0,0	58,7 (+33,7%)	2,5	41,9%

O consumo com o ar condicionado no modo de aquecimento acontece apenas para o caso VH, para as maiores fachadas, de 70 e 100% em todas as orientações, porém seu consumo é bem reduzido, sendo, portanto, desconsiderado. A partir dessa tabela observa-se que o caso que consome menos energia com o resfriamento do ar condicionado, em todas as orientações é com o PAF de 40%, sendo o menor caso na fachada sul, com uma redução em relação ao caso com ACc próximo do caso máximo, de 44,5%.

Mesmo com a alteração da orientação da saleta comercial para o Modelo 1:1 verificou-se o mesmo padrão em relação à redução do consumo total do

⁹ Os percentuais representam a redução referente ao menor consumo de resfriamento do ar condicionado no modo misto de acordo com cada PAF em cada orientação.

sistema já verificada com a fachada norte, que considera os equipamentos e a iluminação artificial, de maneira que o fator que mais influencia na redução do consumo final nos modelos foi o uso do ar condicionado com o modo misto.

d) Modelos 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1

A redução do consumo de energia do ar condicionado para o caso com ventilação híbrida em relação ao caso com ar condicionado constante e o risco de ofuscamento nesses ambientes foi verificado para os Modelos 1:2, 1:3, 2:1 e 3:1 comparados com o Modelo 1:1, nas figuras 57, 58 e 59.

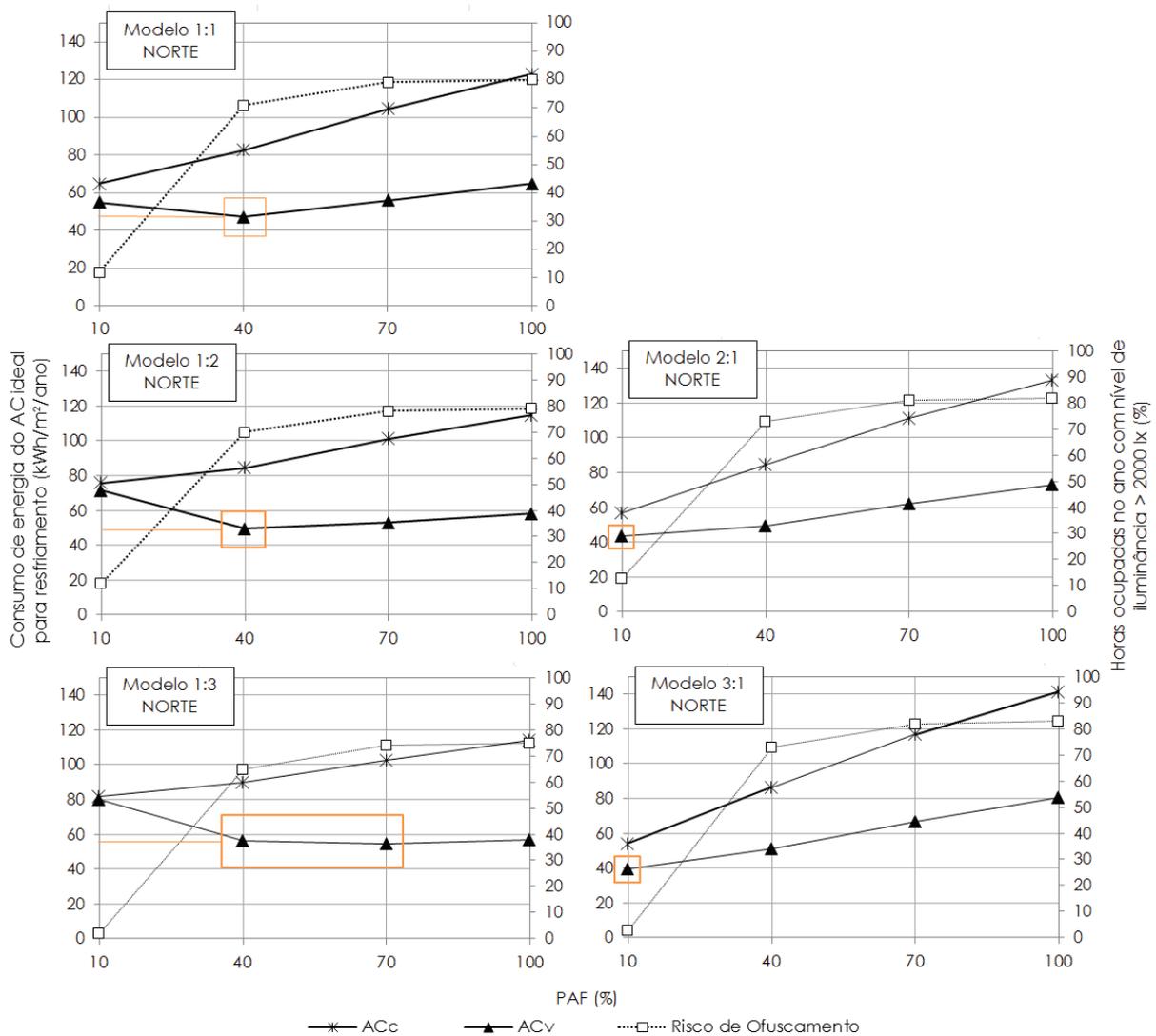


Figura 57 - Consumos de energia para o AC ideal e risco de ofuscamento dos Modelos 1:2, 1:3, 1:1, 2:1 e 3:1 todos os PAF's e orientação norte

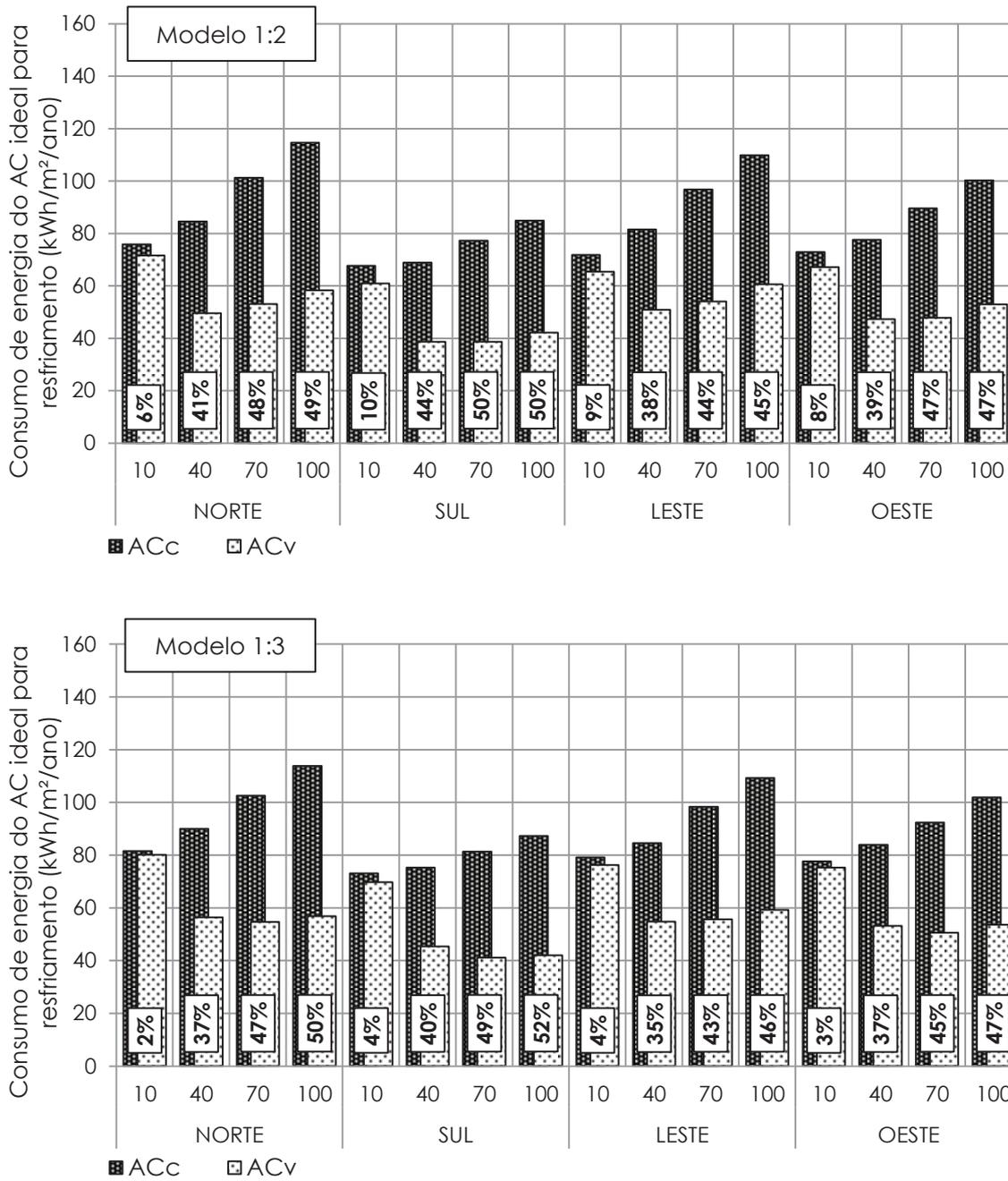


Figura 58 - Redução do consumo do ar condicionado com a ventilação híbrida dos Modelos 1:2 e 1:3, todos os PAF's e todas as orientações

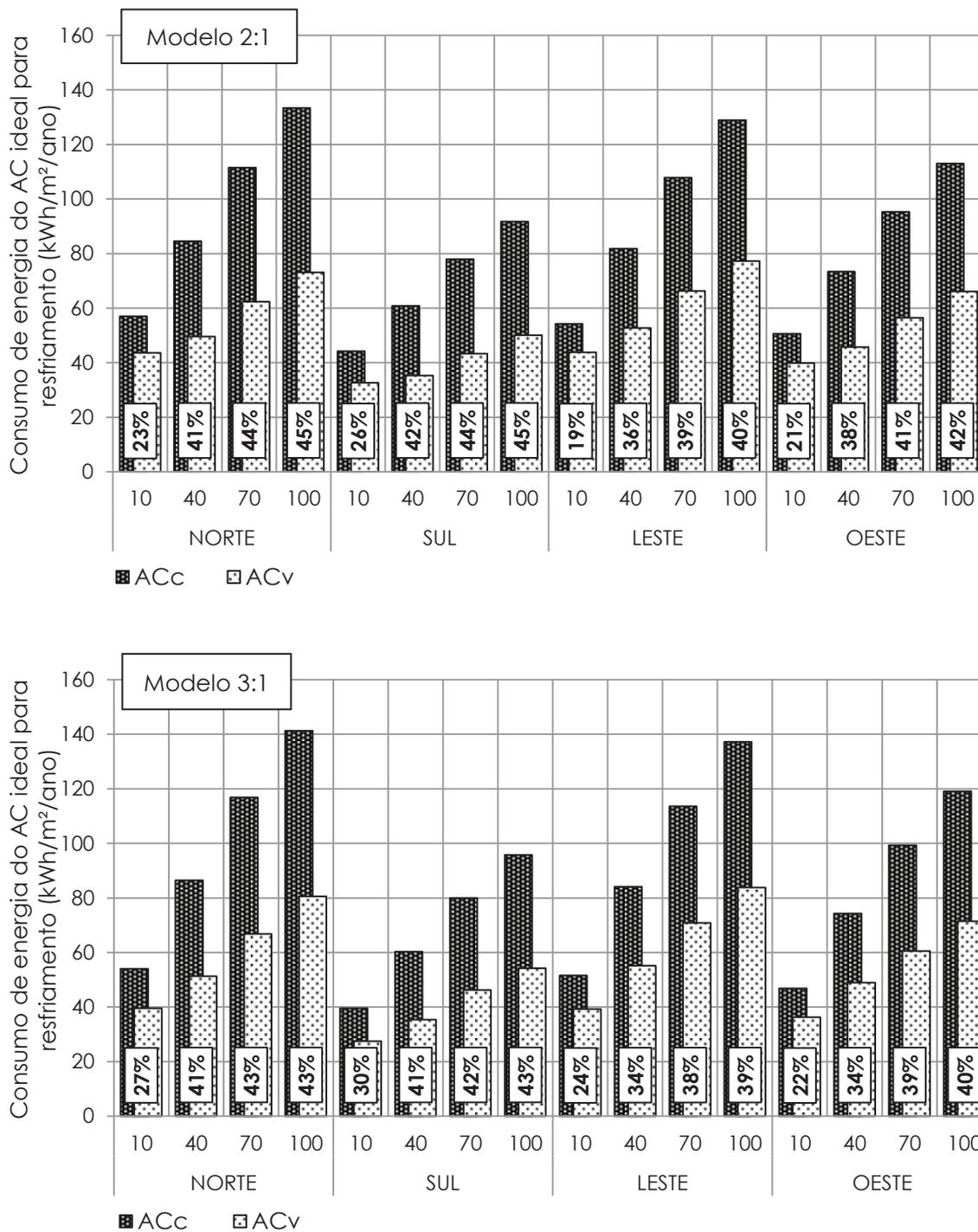


Figura 59 - Redução do consumo do ar condicionado com a ventilação híbrida dos Modelos 2:1 e 3:1, todos os PAF's e todas as orientações

A partir desses resultados, observa-se que há uma alteração na curva de consumo do ar condicionado no modo misto dos Modelos 1:2, 1:3, 2:1 e 3:1, se comparados ao Modelo 1:1. À medida que a sala vai se tornando mais profunda (1:2 e 1:3) o ponto de mínimo de consumo que antes era atingido com o PAF de 40%, começa a ficar menos evidente, e os consumos do ar condicionado (ACv)

com os PAF's de 70 e 100% se tornam muito próximos. Também é observado um aumento, apesar de pequeno, do consumo da iluminação artificial, devido ao fato das salas mais profundas não conseguirem aproveitar da luz do dia de forma tão eficaz. Ou seja, o aumento da área de abertura na fachada (a partir de 40%) passa a ter uma menor influência no aumento do consumo do ar condicionado no modo misto (ACv) em salas mais profundas, já que os ganhos solares são menores, se comparados ao Modelo 1:1.

Por outro lado, conforme se aumenta a largura da sala e diminui-se a sua profundidade (2:1 e 3:1) o ponto de mínimo passa a ser o menor PAF, de 10%. Nesse caso, a influência do aumento da área de abertura na fachada é maior nessa geometria, devido ao fato da área de janela ser maior nas fachadas mais largas, recebendo uma elevada quantidade de ganho solar através do vidro (ver item 4.4). Apesar da ventilação natural ser mais eficaz, devido à menor profundidade da sala, ela não consegue ser suficiente para remover o calor a ponto de ter um menor consumo do ambiente com o ar condicionado para os PAF's de 40, 70 e 100%, como visto nos Modelos 1:1, 1:2 e 1:3. Com isso, para os Modelos 2:1 e 3:1, o PAF de 10% limita este ganho de calor pelo vidro e também realiza a ventilação do ambiente, mesmo com uma janela de pequena dimensão, já que a sala é pouco profunda.

A Tabela 23 indica, para todos os modelos, as reduções mínimas e máximas atingidas do ar condicionado para resfriamento e do consumo total da saleta comercial com o caso da ventilação híbrida, se comparado a um ambiente com o uso do ar condicionado constante. Foram agrupados os PAF's de 40, 70 e 100%, observando-se que as reduções mínimas e máximas são próximas, e também as atingidas entre todas as orientações.

Diante dos resultados foi possível atingir, com todos os modelos, uma redução do consumo do ar condicionado para resfriamento, de 33,7 a 51,2%, com os PAF's de 40, 70 e 100%, destoando-se desse conjunto o PAF de 10% com menores reduções, de 1,7 a 30,2%. Em relação ao consumo total, considerando os equipamentos, iluminação artificial e um ar condicionado do tipo *Split* as reduções foram de 13,5 a 26,4% com os PAF's de 40, 70 e 100% e de 0,6 a 9,4% com o PAF de 10%.

Tabela 23 - Reduções mínimas e máximas do consumo do ar condicionado para resfriamento com o modo misto, todos os Modelos, PAF's e orientações

Modelos	Reduções do ar condicionado para resfriamento (%)		Reduções totais (%)		
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	
Modelo 1:1					
PAF (%)	10	15,4	21,7	5,3	6,4
	40, 70, 100	37,4	45,9	16,7	26,4
Modelo 1:2					
PAF (%)	10	5,7	10	1,9	3
	40, 70, 100	37,6	49,6	15,5	26,1
Modelo 1:3					
PAF (%)	10	1,7	4,5	0,6	1,3
	40, 70, 100	35,3	51,2	13,5	24,8
Modelo 2:1					
PAF (%)	10	19,2	26,1	6,6	8,3
	40, 70, 100	35,4	42,6	16,2	26,3
Modelo 3:1					
PAF (%)	10	22,5	30,2	7,1	9,4
	40, 70, 100	33,7	41,2	14,9	25,6

4.5 Síntese dos principais resultados encontrados em todos os Modelos

a) Em relação à iluminação natural complementada com a artificial:

- Os PAF de 40, 70 e 100% apresentam um uso semelhante de iluminação natural, com maiores riscos de ofuscamento em locais próximos à janela.
- O menor aproveitamento da luz do dia se apresentou para o PAF de 10%, refletindo em um maior consumo da iluminação artificial, contudo com menores riscos de ofuscamento.
- O consumo da iluminação artificial foi bem reduzido, se comparado aos outros usos finais (equipamentos e ar condicionado), por se tratar de um sistema dimerizável com alta eficiência (nível A).
- A alteração de orientação demonstrou ter uma maior influência apenas no uso da iluminação artificial e natural para a área envidraçada (PAF de 10%). Conforme se aumenta a área envidraçada, essas diferenças ficam cada vez menores, tendo um padrão muito parecido (PAF's de 40, 70 e 100%).

- Em relação ao critério UDI, a orientação norte possui maiores riscos de ofuscamento e a orientação sul, menores, e as orientações leste e oeste possuem um comportamento muito semelhante e intermediário.

b) Em relação ao caso com ventilação híbrida e ao caso com ar condicionado constante:

- Houve um pequeno consumo do ar condicionado para aquecimento para alguns casos com VH, com os PAF's de 70 e 100%, em todas as orientações, porém os valores foram muito pequenos, podendo ser desconsiderados.
- Tanto para os casos VH e ACc, o ganho solar demonstrou ser o fator mais impactante ao se aumentar a área envidraçada em cada saleta comercial. Responsável por aumentar o ganho térmico do ambiente, geralmente é necessário haver o maior consumo do ar condicionado para retirar esse calor, mesmo em casos com VH.
- O mesmo padrão de funcionamento dos casos com ventilação híbrida e com ar condicionado constante para a orientação norte se repetem para as outras orientações. Porém, a fachada norte possui uma maior quantidade de horas em que o ar condicionado é acionado, tanto para o caso ACc, como para o caso ACv
- A alteração de orientação teve uma influência maior nos padrões de funcionamento e nos consumos para uma área envidraçada menor (PAF de 10%). Conforme se aumenta a área envidraçada, essas diferenças ficam cada vez menores (PAF de 40, 70 e 100%).
- Utilizar-se da ventilação híbrida sempre representou uma economia de energia, para todos os ambientes.
- O fator que influenciou na redução do consumo final total (ar condicionado, equipamentos e iluminação artificial) dos modelos com caso VH comparados com o caso ACc (exceto com PAF de 10%), foi a redução do consumo do ar condicionado com o modo misto.
- Foi possível atingir com todos os modelos, PAF's de 40, 70 e 100%, e todas as orientações, uma redução entre 33,7 e 51,2% do consumo do ar condicionado para resfriamento no caso com ventilação híbrida, comparado com o consumo do ar condicionado de forma constante,

destoando-se desse conjunto o PAF de 10%, com menores reduções (1,7 e 30,2%). Em relação ao consumo total as reduções foram de 13,5 a 26,4% com os PAF's de 40, 70 e 100% e de 0,6 a 9,4% com o PAF de 10%.

4.6 Influência de outros parâmetros

Os Modelos 3:1 e 1:3 com orientação norte foram escolhidos para se realizar uma análise observando a influência ao se variar outros parâmetros, verificando se haveria uma melhoria ou piora na economia de energia para o caso com ventilação híbrida. Verificou-se a possibilidade em se alterar a curva de consumo do ar condicionado (ACv) conforme se aumenta o PAF. Para a sala mais larga do que profunda (3:1), modificou-se o nível de carga térmica dos equipamentos (de uma carga média de 10,7 W/m² para uma carga leve de 5,4 W/m²) e a temperatura de controle do acionamento do ar condicionado (de 25°C para 26°C). E para o modelo mais profundo (1:3) modificou-se também o nível de carga térmica dos equipamentos, porém com o aumento do mesmo (de uma carga média de 10,7 W/m² para uma carga alta de 21,5 W/m²) e a redução da abertura efetiva do vão de ventilação da janela (de 100% para 50%). Os resultados podem ser observados nas Figuras 60 e 61.

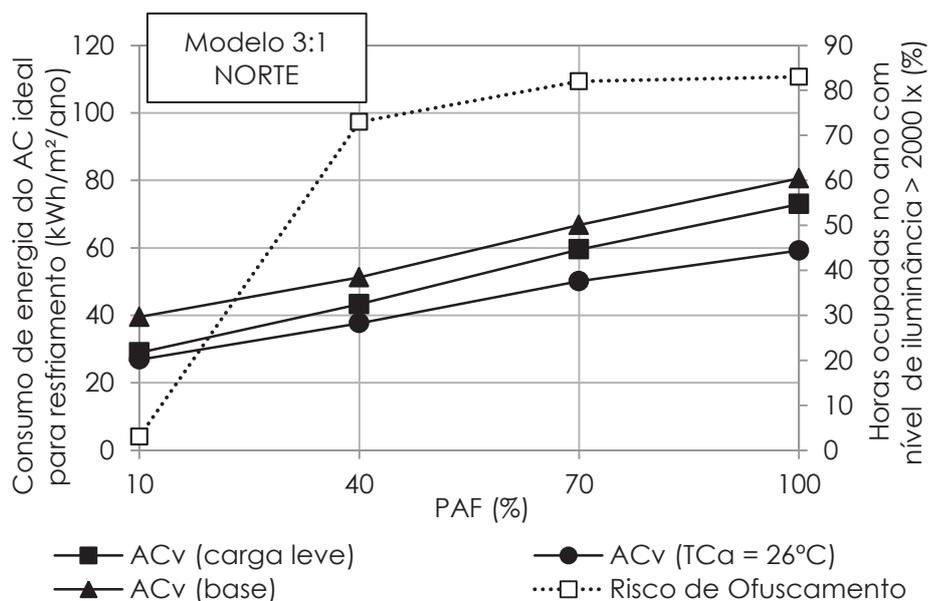


Figura 60 - Consumos de energia para o AC ideal e risco de ofuscamento do Modelo 3:1, todos os PAF's, orientação norte e alteração de carga de equipamentos e TCa

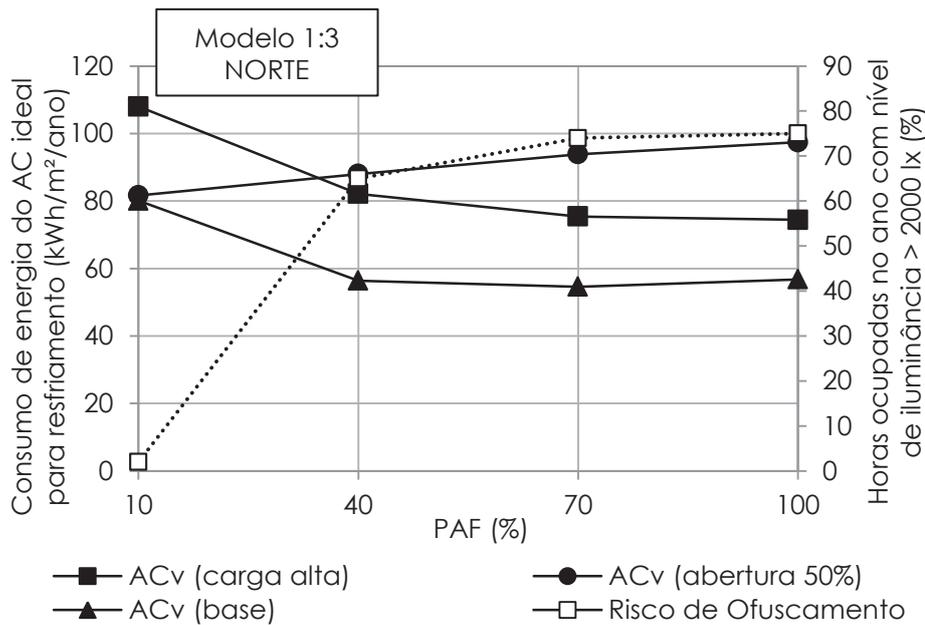


Figura 61 - Consumos de energia para o AC ideal e risco de ofuscamento do Modelo 1:3, todos os PAF's, orientação norte e alteração de carga de equipamentos e abertura do vão

Observa-se que, quando se altera a carga térmica, ocorre uma diminuição do consumo do ar condicionado no Modelo 3:1, pois a carga foi reduzida, e um aumento do mesmo no Modelo 1:3, devido à elevação da carga. No entanto, em ambos, não ocorre uma variação da forma da curva de consumo, se comparada à correspondente do modelo original. Isso acontece porque as cargas térmicas são as mesmas para todos os PAF's, de forma que, mesmo com a diminuição ou o aumento desse valor, há a diminuição ou aumento do consumo do ar condicionado e da utilização da ventilação natural de maneira proporcional. Esse fato pode ser exemplificado através dos gráficos de ganhos e de perdas do Modelo 1:3 na Figura 62.

Ao se alterar a temperatura de controle do ar condicionado (TCa) de 25°C para 26°C do Modelo 3:1, verifica-se a maior diminuição do consumo do ar condicionado entre essas variações. Com o aumento de apenas 1°C da TCa é possível conseguir uma redução de 25 a 32% deste consumo, dependendo da área de abertura na fachada. Isso indica a importância em se utilizar uma temperatura de controle adequada para esse ambiente, sendo que maiores TCa representam uma maior economia para o ambiente. No entanto, não é alterado o padrão observado nos resultados, permanecendo a curva no mesmo formato.

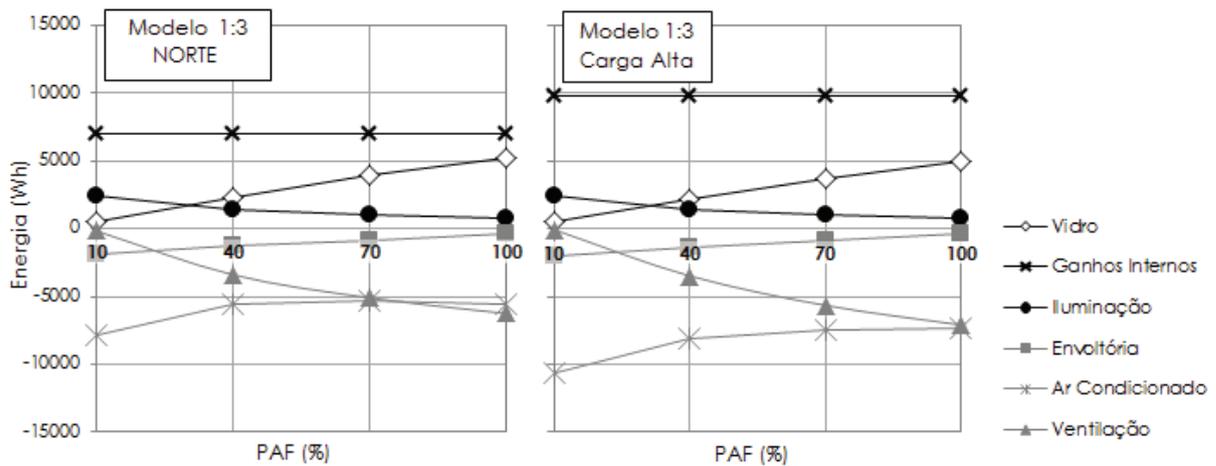


Figura 62 - Somatória dos ganhos e perdas de calor em relação a cada parâmetro do Modelo 1:3, todos os PAF's, orientação norte e variação de carga alta

Com a alteração da área efetiva de abertura da janela para a ventilação de 100% para 50% do vão, para o Modelo 1:3, há uma grande redução na eficiência da ventilação natural, causando a alteração na curva de consumo do ar condicionado, já que este tem o seu consumo elevado para conseguir retirar o calor deste ambiente, que antes era realizado pela ventilação natural com a abertura de 100% do vão. Este fato pode ser observado através dos gráficos de ganhos e de perdas na Figura 63.

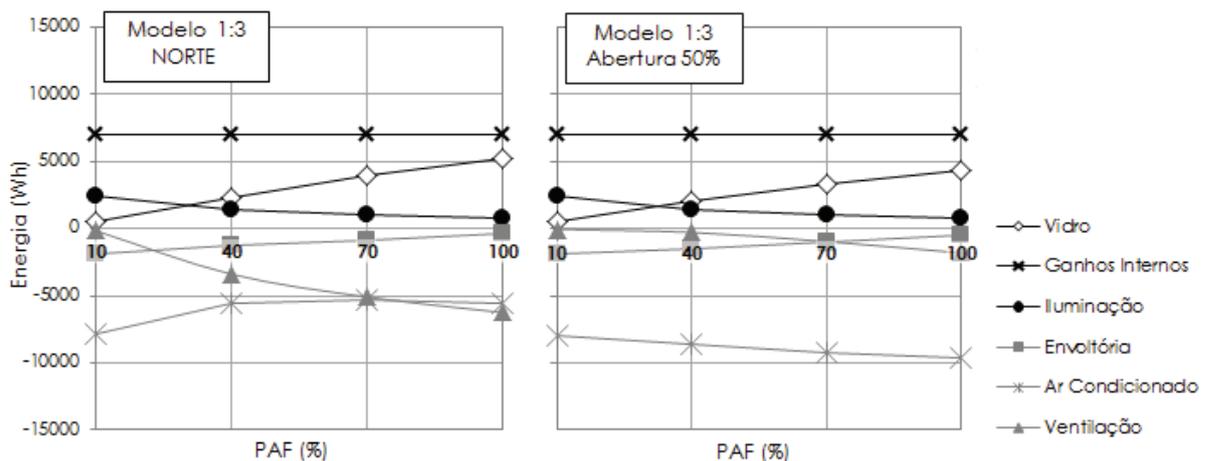


Figura 63 - Somatória dos ganhos e perdas de calor em relação a cada parâmetro do Modelo 1:3, todos os PAF's, orientação norte e variação da abertura efetiva

Para se observar se o padrão da curva de redução do consumo do ar condicionado e risco de ofuscamento permanecia o mesmo, foi realizada a última simulação com novas dimensões de PAF's, de 20 e 30%, para todos os modelos, orientação norte e para o modo com ventilação híbrida e ar condicionado

constante. A Figura 64 apresenta esses resultados, incluindo também o uso da iluminação artificial durante o ano.

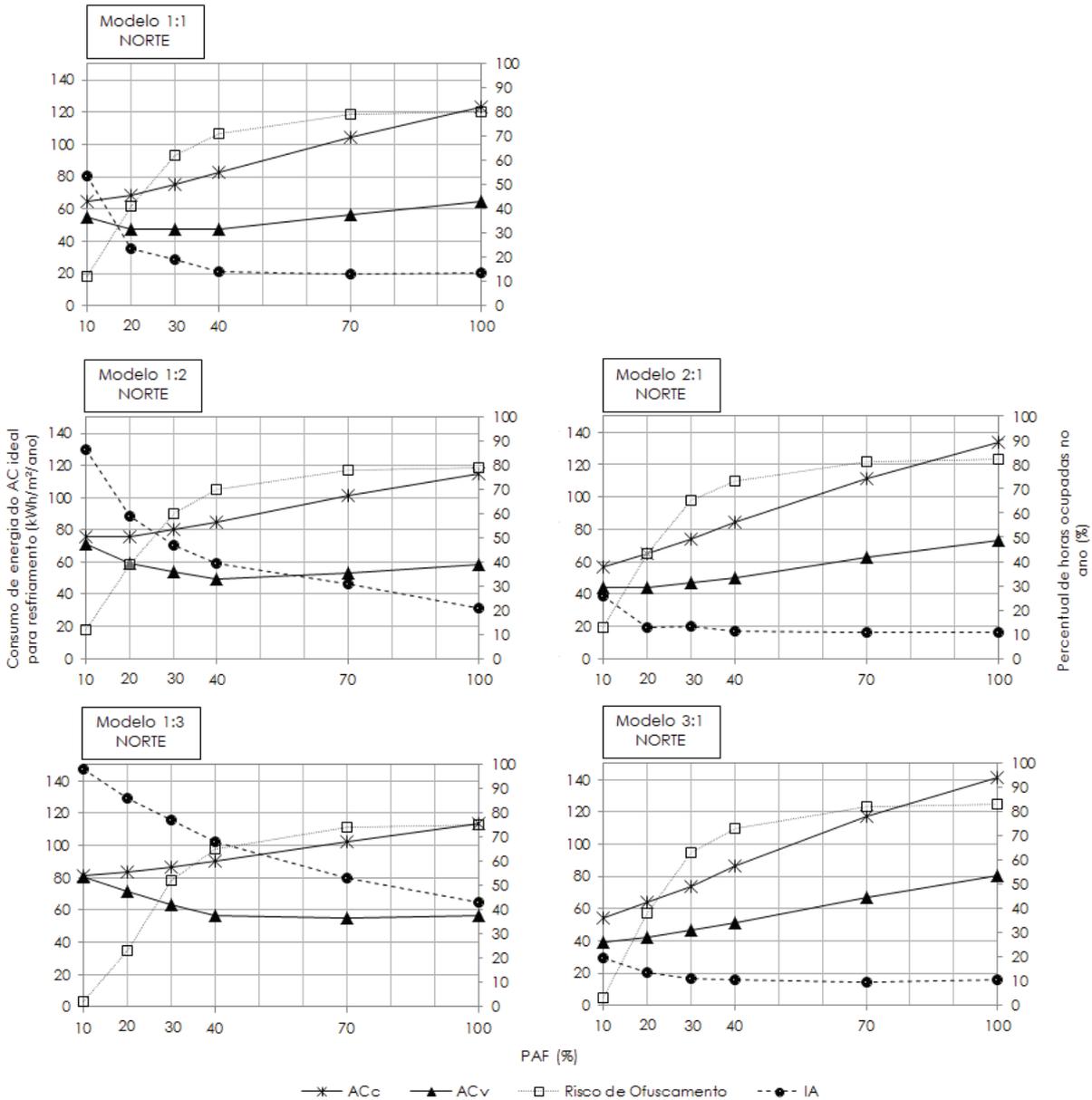


Figura 64 –Consumo de energia para o AC ideal, risco de ofuscamento e uso da iluminação artificial para todos os Modelos, orientação norte e PAF's de 10, 20, 30, 40, 70 e 100%

Verifica-se que a tendência das curvas não obtiveram grandes modificações em comparação a Figura 57, apresentada anteriormente. A maior diferença mostrou-se para o Modelo 1:1, sendo que o ponto de menor consumo com a ventilação híbrida, com o PAF de 40% permanece muito próximo com os PAF's de 20 e 30%, e essas menores dimensões proporcionam um menor risco de ofuscamento no ambiente, com um uso próximo da iluminação artificial.

5 CONCLUSÕES

O trabalho teve como objetivo principal avaliar a influência da forma da sala, tamanho e orientação solar das aberturas no consumo de energia e no conforto visual, em saletas comerciais que se utilizassem da ventilação híbrida e integração da iluminação natural com a artificial na cidade de São Paulo. Esse processo foi realizado com base no método proposto por Rupp e Ghisi (2012) e Ghisi e Thinker (2005), em relação ao dimensionamento da área de janela levando em consideração como critério o menor consumo energético. Utilizou-se como ferramentas o *EnergyPlus* para a análise energética e o *DIVA-for-Rhino* para a análise lumínica.

Como principal conclusão desta dissertação se observou, através de todas as análises realizadas com saletas comerciais de áreas de 36 m², janelas com abertura efetiva do vão de 100% e vidro incolor, que os dois principais parâmetros de projeto analisados que influenciaram tanto no consumo de energia, quanto no conforto visual foram: a forma da sala e a área de abertura na fachada. A forma da sala é essencial para a decisão da área de abertura na fachada, que consome menos energia em um ambiente com ventilação híbrida e integração da iluminação natural à artificial, sendo que a orientação ficou em segundo plano com essas geometrias apresentadas.

As salas menos profundas e mais largas (2:1 até 3:1) devem ter áreas de janelas menores para conseguir um mínimo consumo energético e menor risco de ofuscamento. O menor percentual de área de abertura na fachada (PAF) estudado foi de 10%, no entanto, nesse tipo de sala, essa área não satisfaz a necessidade de contato visual com o exterior, e, portanto, cabe ao projetista tentar estabelecer a dimensão mínima possível, observando sempre que o consumo do ar condicionado aumenta com o aumento do PAF, bem como o risco de ofuscamento, especialmente para pontos próximos à janela.

Para salas mais quadradas (1:1), podem-se utilizar janelas com PAF's maiores (até 40%), para conseguir menor consumo energético. Porém em salas com essa forma, não é fácil conciliar os requisitos de conforto visual. Apesar da janela com PAF de 40% fornecer o menor consumo de energia para o ar condicionado, há o alto risco de ofuscamento, tanto em pontos próximos à janela (1,20 m), quanto até os mais afastados (2,4 m). O maior risco de ofuscamento pode fazer com que o

usuário tenha que se adaptar, mudando de posição na sala ou utilizando de proteções solares, fechando as persianas, por exemplo, o que pode diminuir a eficiência da ventilação e iluminação naturais.

Salas mais estreitas e profundas (1:2 até 1:3) têm um consumo menor de energia inclusive com janelas maiores (valores com PAF's próximos de 40 a 100%), contudo, essas áreas de abertura na fachada correspondem a um elevado risco de ofuscamento nos pontos próximos à janela.

O uso da ventilação híbrida sempre representou uma economia de energia para as saletas comerciais, porém sua eficácia pode ser reduzida caso esses ambientes estejam em uma região com elevado ruído e/ou poluição e o usuário não haja de forma consciente. Neste trabalho foi possível atingir, em todas as saletas comerciais analisadas, para as maiores aberturas na fachada (PAF's de 40, 70, 100%), uma redução entre 33,7 e 51,2% do consumo do ar condicionado para resfriamento ao se comparar as mesmas salas utilizando um sistema de climatização constante, destoando-se desse conjunto apenas a menor área de abertura na fachada (PAF de 10%), com menores reduções, entre 1,7 e 30,2%. Em relação ao consumo total, considerando os equipamentos, iluminação artificial e considerando um ar condicionado do tipo *Split*, as reduções totais das salas foram de 13,5 a 26,4% com os PAF's de 40, 70 e 100% e de 0,6 a 9,4% com o PAF de 10%.

A alteração da temperatura de controle do ar condicionado para 26°C, a redução/aumento da carga térmica dos equipamentos e o uso de PAF's de 20 e 30%, não alteraram de forma significativa as conclusões já apresentadas. No entanto, a redução da área de abertura efetiva para 50% do vão, muito utilizada na realidade, reduz consideravelmente o potencial de remoção do calor pela ventilação, fazendo com que as salas mais profundas, que antes permitiam o uso de janelas maiores, com baixo consumo energético (embora com elevado risco de ofuscamento), alterem seu padrão de comportamento, e tenham o menor consumo para as janelas menores (PAF de 10%), de forma idêntica ao que já ocorria nas salas mais largas e pouco profundas.

Por fim, observou-se que a consideração de elementos de proteção solar que não diminuam a eficácia da ventilação e iluminação naturais podem ser estratégias interessantes, proporcionando o baixo consumo de energia e menores riscos de ofuscamento. Como limitações do estudo se apresentam, os resultados

analisados apenas para essa dimensão (área média de saleta comercial) e a consideração do controle ideal do ambiente.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se o maior aprofundamento em análises de edificações de modo misto que se utilizem da integração da iluminação natural para diferentes cidades brasileiras. Como sugestão, poderiam ser realizadas variações de outros parâmetros nestas mesmas saletas comerciais, aumentando-se a eficiência da ventilação natural a partir da ventilação cruzada ou/e evitando-se os riscos de ofuscamento a partir da inserção de elementos de proteção solar. Para realizar tais análises seria interessante aliar o trabalho da simulação com medições em túnel de vento e/ou simulações em programas computacionais de dinâmica dos fluidos (CFD), já que os coeficientes de pressão utilizados neste trabalho foram calculados automaticamente pelo *EnergyPlus*. A utilização de coeficientes de pressão atrelados às geometrias, áreas de aberturas na fachada e proteções solares dos modelos poderão gerar resultados mais precisos. Além disso, podem permitir uma análise mais completa da ventilação híbrida, proporcionando a observação da velocidade e da direção do fluxo de ar e da verificação mais precisa do impacto da ventilação em aberturas em uma única fachada.

 REFERÊNCIAS¹⁰

ALZOUBI, H. H.; AL-ZOUBI, A. H. Assessment of building facade performance in terms of daylighting and the associated energy consumption in architectural spaces: Vertical and horizontal shading devices for southern exposure facades. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 8, p. 1592–1599, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55 – 1992**. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 1992.

_____. **ANSI/ASHRAE Standard 140 – 2004**. Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2004.

_____. **ANSI/ASHRAE Standard 55 – 2013**. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2013.

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. **Anais...** Búzios, RJ, Brasil, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9077**: Saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 15215-4**. Iluminação natural. Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15220-2**. Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR 15220-3**. Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR 16401-1**. Instalações de ar-condicionado, sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro, 2008b.

_____. **NBR 16401-3**. Instalações de ar-condicionado, sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008a.

_____. **NBR ISO/CIE 8995** - Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior. Rio de Janeiro, 2013.

BATTLE, T. **The commercial offices handbook**. RIBAS Enterprises: Londres, 2003.

¹⁰ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

BELLERI, A.; LOLLINI, R.; DUTTON, S. M. Natural ventilation design: An analysis of predicted and measured performance. **Building and Environment**, v. 81, p. 123–138, 2014.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 3. ed. Edufal: Maceió, 2008.

BRAGER, G. S. Mixed-Mode Cooling. **ASHRAE Journal**, v. 48, p. 30-37, 2006.

BRAGER, G. S.; RING, E.; POWELL, K. Mixed-mode Ventilation: HVAC meets Mother Nature. **Engineered Systems**, n. May, p. 60–70, 2000.

BRASIL. Código de obras e edificações - COE. Lei no 11.228/92, 1992.

BRUGNERA, R. R. **Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com estratégias de ventilação híbrida**. 2014. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BRUGNERA, R. R.; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. Temperaturas de acionamento de condicionadores de ar e ventiladores. XII Encontro Nacional e VIII Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais..** n. 1, p. 1–10, 2013.

BRUGNERA, R. R.; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M.S. **Análise crítica, aprofundamento e outras questões da Dissertação de Mestrado de Brugnera 2014, intitulada: Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com estratégias de ventilação híbrida**. São Carlos: USP, 2016. Relatório interno.

BUILDINGS. Pesquisa Imobiliária Inteligente. Primeira empresa brasileira especializada em pesquisa imobiliária corporativa. Disponível em: <<http://www.buildings.com.br/>>. Acesso em: 18 abr. 2016.

CEN. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings: addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. **EN15251**. Brussels: Comite Europeen de Normalisation, 2007

Center for the Built Environment (CBE). **About Mixed Mode**. University of California, Berkeley. Disponível em: <<http://www.cbe.berkeley.edu/mixedmode/aboutmm.html>>. Acesso em: 18 abr. 2016.

CEPAGRI – CENTRO DE PESQUISAS METEOROLOGICAS E CLIMATICAS APLICADAS A AGRICULTURA. **Clima dos Municípios Paulistas**. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 11 dez. 2016.

CRAWLEY, D. B.; JON W. HAND, J. W.; KUMMERT, M.; GRIFFITH, B. T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v. 43, p. 661-673, 2008.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Transactions**, v. 104, p. 145–167, 1998.

DE VECCHI, R. **Avaliação de conforto térmico em edificações comerciais que operam sob sistemas mistos de condicionamento ambiental em clima temperado e**

úmido. 2015. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

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.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 139–154, 2010.

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

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**, v. 53, n. 3, p. 297–306, 2010.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **EnergyPlus. Version 8.2.0**. US: Department of Energy Efficiency and Renewable. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 31 jul. 2014.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2015**: ano base 2014. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EUROPEAN COMMISSION. **Daylighting in buildings**. School of Architecture, University College Dublin Richview Clonskeagh, Dublin, Ireland, 1994.

EZZELDIN, S.; REES, S. J. The potential for office buildings with mixed-mode ventilation and low energy cooling systems in arid climates. **Energy and Buildings**, v. 65, p. 368–381, 2013.

FASI, M. A.; BUDAIWI, I. M. Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 307–316, 2015.

FIGUEIREDO, C. M. DE. **Ventilação natural em edifícios de escritório na cidade de São Paulo: limites e possibilidades do ponto de vista do conforto térmico**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

FIGUEIREDO, C. M.; FROTA, A. B. **Ventilação natural para conforto térmico em edifícios de escritórios – Avaliação com modelos adaptativos**. Disponível em: <<http://www.usp.br/nutau/CD/149.pdf>>. Acesso em: 8 abr. 2016.

FRANZETTI, C.; FRAISSE, G.; ACHARD, G. Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 2, p. 117–126, 2004.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo**. 5. ed. Studio Nobel: São Paulo, 2001.

GENTILE, N.; LAIKE, T.; DUBOIS, M. C. Lighting control systems in individual offices rooms at high latitude: Measurements of electricity savings and occupants' satisfaction. **Solar Energy**, v. 127, p. 113–123, 2016.

GHSI, 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.

GHSI, E.; TINKER, J. A. An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. **Building and Environment**, v. 40, n. 1, p. 51–61, 2005.

GHSI, 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**, v. 5, n. 4, p. 81–93, 2005.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício Ambiental**. Oficina de Textos: São Paulo, 2015.

GURGEL, M. **Projetando espaços: guia de arquitetura de interiores para áreas comerciais**. Senac: São Paulo, 2006

HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Iluminação Natural**. 2. ed. Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, 1975.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **RTQ-C: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **Condicionadores de ar Split Hi-Wall**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores_ar_split_hiwall_indic_enovo.pdf>. Acesso em: 7 mai. 2016.

ISO. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. ISO Standard 7730: Moderate Thermal Environments. Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardisation; 1998.

JACOBS, A. **Radiance Tutorial**. 2012. Disponível em: <http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/documentation/docs/radiance_tutorial.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2014.

JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. DIVA 2.0: Integrating Daylight and Thermal Simulations Using Rhinoceros 3D, Daysim and Energyplus. **Proceedings of Building Simulation**, p. 2202–2209, 2011.

JI, Y.; LOMAS, K. J.; COOK, M. J. Hybrid ventilation for low energy building design in south China. **Building and Environment**, v. 44, n. 11, p. 2245–2255, 2009.

KARAVA, P.; ATHIENITIS, A.K.; STATHOPOULOS, T.; MOURIK, E. Experimental study of the thermal performance of a large institutional building with mixed-mode cooling and hybrid ventilation. **Building and Environment**, v. 57, p. 313–326, 2012.

KIM, W.; JEON, Y.; KIM, Y. Simulation-based optimization of an integrated daylighting and HVAC system using the design of experiments method. **Applied Energy**, v. 162, p. 666–674, 2016.

KOTA, S.; HARBERL, J. S. Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and Their Use in Energy Performance Simulations. **Proceedings of the Ninth International Conference for Enhanced Building Operations**. Austin, Texas: 2009.

KRARTI, M.; ERICKSON, P. M.; HILLMAN, T. C. A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting. **Building and Environment**, v. 40, n. 6, p. 747–754, 2005.

LABEEE; CRAWLEY, D.; LAWRIE, L. **Arquivos climáticos INMET 2015**. 2015. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2015>>. Acesso em: 7 mai. 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. São Paulo: Ed. PW Brasil, 2014.

LEAMAN, A.; BORDASS, B. Are users more tolerant of “green” buildings? **Building Research & Information**, v. 35, n. 6, p. 662–673, 2007.

LI, D. H. W.; WONG, S. L. Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings. **Applied Energy**, v. 84, n. 12, p. 1199–1209, 2007.

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, n. 1, p. 32–44, 2007.

MARCONDES, M. P. **Soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo**. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

MENDLER, S.; ODELL, W.; LAZARUS, M. A. **The HOK guidebook to sustainable design**. 2. ed. Nova York: Wiley, 2006.

MUSTAFARAJ, G.; MARINI, D.; COSTA, A., KEANE, M. Model calibration for building energy efficiency simulation. **Applied Energy**, v. 130, p. 72–85, 2014.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. **Lighting Research and Technology**, v. 37, n. 1, p. 41–59, 2005.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 905–913, 2006.

NGUYEN, A. T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043–1058, 2014.

OCHOA, C. E.; ARIES, M. B. C.; VAN LOENEN, E.J.; HENSEN, J. L. M. Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. **Applied Energy**, v. 95, p. 238–245, 2012.

OPENSTUDIO. **Open Studio Open source project (LGPL)**. 2014. Disponível em: <<https://www.openstudio.net/>>. Acesso em: 31 jul. 2014.

PEREIRA, H. A. C. P.; MELO, A.P.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; MATOS, M.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus – Versão 8.0**. Florianópolis, 2013.

RACKES, A.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. **Applied Energy**, v. 174, p. 256–274, 2016.

RAMOS, G.; GHISI, E. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. **Ambiente Construído**, vol. 10, n. 2, p. 157–169, 2010.

REINHART, C. F. A simulation-based review of the ubiquitous window-head-height to daylight zone depth rule-of-thumb. **Proceedings of Building Simulation 2005, Ninth International IBPSA Conference**, Montréal, Canada, August 15-18, p. 1011–1018, 2005.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. **LEUKOS**, v. 3, n. 1, p. 7–31, 2006.

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

REINHART, C.; FITZ, A. Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 824–835, 2006.

ROAF, S.; CRICHTON, D.; NICOL, F. **A adaptação de edificações e cidades às mudanças climáticas: um guia de sobrevivência para o século XXI**. Bookman: Porto Alegre, 2009.

ROMERO, A. V. R. **Reflexões sobre ferramentas de apoio para eficiência energética no ambiente construído**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.

RORIZ, M. **Base de dados climáticos de 411 municípios brasileiros**. Arquivos em formato de EPW (Energyplus Weather Data). 2012. Disponível em: <http://www.roriz.eng.br/epw_9.html>. Acesso em: 31 jul. 2014.

RORIZ, V. F.; RORIZ, M. **EPview**. 2015.

RUPP, R. F. **Dimensionamento de área de janela em edificações comerciais: integração da iluminação natural com a artificial e utilização da ventilação híbrida**. 2011. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. **Ambiente Construído**, v. 13, p. 75–86, 2013.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Sizing Window Areas for Daylighting and Hybrid Ventilation in Commercial Buildings. **PLEA 2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture**, n. November, p. 1–6, 2012.

SALCIDO, J. C.; RAHEEM, A. A.; ISSA, R. R. A. From Simulation To Monitoring: Evaluating the Potential of Mixed-Mode Ventilation (MMV) Systems for Integrating Natural Ventilation in Office Buildings Through a Comprehensive Literature Review. **Energy and Buildings**, n. Mmv, 2016.

SHEN, E.; HU, J.; PATEL, M. Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies. **Building and Environment**, v. 78, p. 155–170, 2014.

SKETCHUP. **Sketch Up Trimble Navigation Limited**, 2015. Disponível em: <<https://www.sketchup.com/pt-BR/download>>. Acesso em: 31 jul. 2014.

SOLEMMA. **DIVA-for-Rhino Solemma LLC**, 2014. Disponível em: <<http://diva4rhino.com/>>. Acesso em: 31 jul. 2014.

TAGLIABUE, L. C.; BUZZETTI, M.; AROSIO, B. Energy saving through the sun: Analysis of visual comfort and energy consumption in office space. **Energy Procedia**, v. 30, p. 693–703, 2012.

TIAN, C.; CHEN, T.; YANG, H.; CHUNG, T. A generalized window energy rating system for typical office buildings. **Solar Energy**, v. 84, n. 7, p. 1232–1243, 2010.

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 (Online)**, v. 10, n. 4, p. 37–58, 2010.

UCLA. **Climate Consultant 6.0**. Universidade da Califórnia, Los Angeles, EUA. Disponível em: <<http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu>>. Acesso em 01 ago. 2015.

VELOSO, A. C. DE O.; DE SOUZA, R. V. G.; KOURY, R. N. N. Comparação entre os métodos prescritivo e de simulação do RTQ-C a partir de dados reais de consumo e ocupação. XII Encac - Encontro nacional de conforto no ambiente construído. **Anais..**, n. 1, p. 1–10, 2013.

VIANNA, N. S.; GONÇALVES, J. C. S. **Iluminação e arquitetura**. 3. ed. São Paulo: Geros Arquitetura Ltda, 2007.

WANG, L.; GREENBERG, S. Window operation and impacts on building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 92, p. 313–321, 2015.

YU, X.; SU, Y. Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation - A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 494–503, 2015.

YUN, G.; KIM, K. S. An empirical validation of lighting energy consumption using the integrated simulation method. **Energy and Buildings**, v. 57, p. 144–154, 2013.

.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Catalogação de edifícios de escritórios com saletas comerciais na cidade de São Paulo

Região SP	nº	Edifícios	Ano	Nº Andar	Área/andar (m²)	Área total (m²)	Área Saleta Comercial (m²)	Pé-direito (m)	AC
Alto de Pinheiros / Perdizes	1	La Place Offices Perdizes	2014	7	833.4	5833.7	33		Central
							50		
	2	Empresarial Bachianas	2001	12	460.0	5520.0	43	2.7	Self - Com Distribuição
							52		
	3	Vitrine Offices Pompéia		6	733.3	4400.0	34		Split System
	4	Work Place Building		13	288.0	3744.0	30		Self - Com Distribuição
							34		
	5	Adesso Office Perdizes	2011	15	225.5	3383.0	30		Split System
							50		
	6	Guaporé - Perdizes		15	192.0	2880.0	48		Split System
	7	Trade Tower Perdizes		14	200.0	2800.0	50		Self - Com Distribuição
	8	Centro Empresarial Palma	2013	9	245.4	2208.6	30		Central
31									
9	Centro Empresarial Turiassu		12	152.8	1833.0	31			
10	Milano Offices		10	165.0	1650.0	30		Split System	
11	Perdizes Prime Offices		5	271.2	1356.0	34			
12	Pórtico Offices		10	128.0	1280.0	29		Split System	
						32			
Barra Funda	13	Top Office Tower	2006	15	336.0	5040.0	27		Split System
							29		
	14	Lex Offices		15	360.0	5400.0	30		Split System
15	Memorial Center		9	132.0	1188.0	26		Split System	
						40			
Centro	16	Mirante do Vale	1967	51	756.0	38556.0	27		Split System

continua

Região SP	nº	Edifícios	Ano	Nº Andar	Área/andar (m²)	Área total (m²)	Área Saleta Comercial (m²)	Pé-direito (m)	AC
Faria Lima / Itaim Bibi	17	Monumento	1976	22	650.0	14300.0	21		Central
							49		
	18	Ahead	2011	17	820.0	13940.0	40	2.7	Split System
							43		
19	Brascan Century Offices	2002	24	572.00	13728.00	20	2.70	Split System	
						51			
20	Barão de Rothschild	1974	16	500.06	8004.00	13	2.70	Self - Sem Distribuição	
						54			
Moema / Vila Mariana	21	Corporate Plaza - Comercial State	2002	17	720.00	12259.00	15		Central
							62		
	22	Medical Center Paulista	1999	16	810.00	12960.00	26		Central
							55		
	23	Trend Paulista Offices	2014	14	876.96	12893.00	47		Split System
					1082.00		67		
	24	Top Towers Offices - Torre Sul	2008	20	421.00	8420.00	31	2.70	Central
							52		
	25	Paulista Boulevard	1995	20	360.00	7200.00	30	2.80	Split System
	26	Paulista Plaza The Office	1999	16	420.00	6720.00	32	2.70	Central
							41		
	27	Montreal Office & Services	1999	18	320.00	5760.00	32	2.70	Central
	28	Moema Office Tower	2001	13	410.00	5460.00	20	2.70	Split System
							50		
	29	The Classic Tower	2000	13	400.00	5200.00	40	2.70	Split System
	30	Sena Madureira Offices	2012	11	460.64	5067.00	31	2.70	Split System
43									
31	Wall Street Tower	2000	13	385.00	5005.00	32	2.80	Central	
						35			
32	New Work Tower - Ibirapuera	2003	15	313.00	4695.00	24	2.70	Split System	
						35			
33	Evolution Tower Ibirapuera	2000	14	320.00	4480.00	32	2.70	Split System	
						35			
34	Connect Offices		12	370.00	4440.00	37		Central	
35	G9 Offices II	2013	13	318.00	4134.00	53	2.70		
36	Oxford Paulista	2001	13	300.00	3900.00	30	2.70	Split System	

continuação

Região SP	nº	Edifícios	Ano	Nº Andar	Área/andar (m²)	Área total (m²)	Área Saleta Comercial (m²)	Pé-direito (m)	AC
Morumbi / Jardim São Luiz	37	Guedala Office Center		14	270.00	3780.00	30		Split System
	38	West Tower - Morumbi		14	259.00	3626.00	30		Split System
							44		
39	Condomínio Empresarial Paulista	2005	2	1632.00	3264.00	48		Split System	
Outras	40	Anália Business Center	2013	18	576.00	10368.00	36	2.70	Central
	41	Anália Franco Offices		16	604.00	9664.00	35		Split System
							39		
	42	Helbor Offices São Paulo 3	2011	20	482.18	9644.00	32		Split System
							33		
	43	Green Design Office Santana - Torre A	2013	7	1161.00	8127.00	47		Central
55									
44	Spot Offices Penha	2014	12	337.92	6880.00	30	2.70	Split System	
				631.77		34			
Paulista	45	Sir Winston Churchill	1974	25	625.00	15625.00	15	2.80	Split System
							36		
	46	Barão de Christina	1977	16	352.00	6688.00	20		Self - Sem Distribuição
23									
47	Barão de Pedra Negra	1979	17	390.00	6630.00	30	2.70	Split System	
Santo Amaro	48	Company Work Station	2010	15	457.00	7335.00	23		Central
							43		
	49	Work Center - IV	2000	18	300.00	5400.00	30	2.70	Split System
50	Neo Offices Adolfo Pinheiro	2014	8	463.40	3679.00	33		Self - Com Distribuição	
						44			
Saúde / Jabaq.	51	Station Offices - Saúde		15	545.93	8189.00	36		Self - Com Distribuição
							44		

continuação

Região SP	nº	Edifícios	Ano	Nº Andar	Área/andar (m²)	Área total (m²)	Área Saleta Comercial (m²)	Pé-direito (m)	AC
Vila Olímp.	52	Vila Olímpia Prime Offices	2014	19	362.87	11885.00	38		Split System
					772.90		61		
	53	ITC - International Trade Center Business	2000	18	462.00	8316.00	33	2.70	Self - Com Distribuição
	54	The Triumph	2010	16	460.48	7368.00	32 36	2.70	Central
55	Net Office Empresarial	1999	11	444.00	4884.00	33 41	2.70	Central	

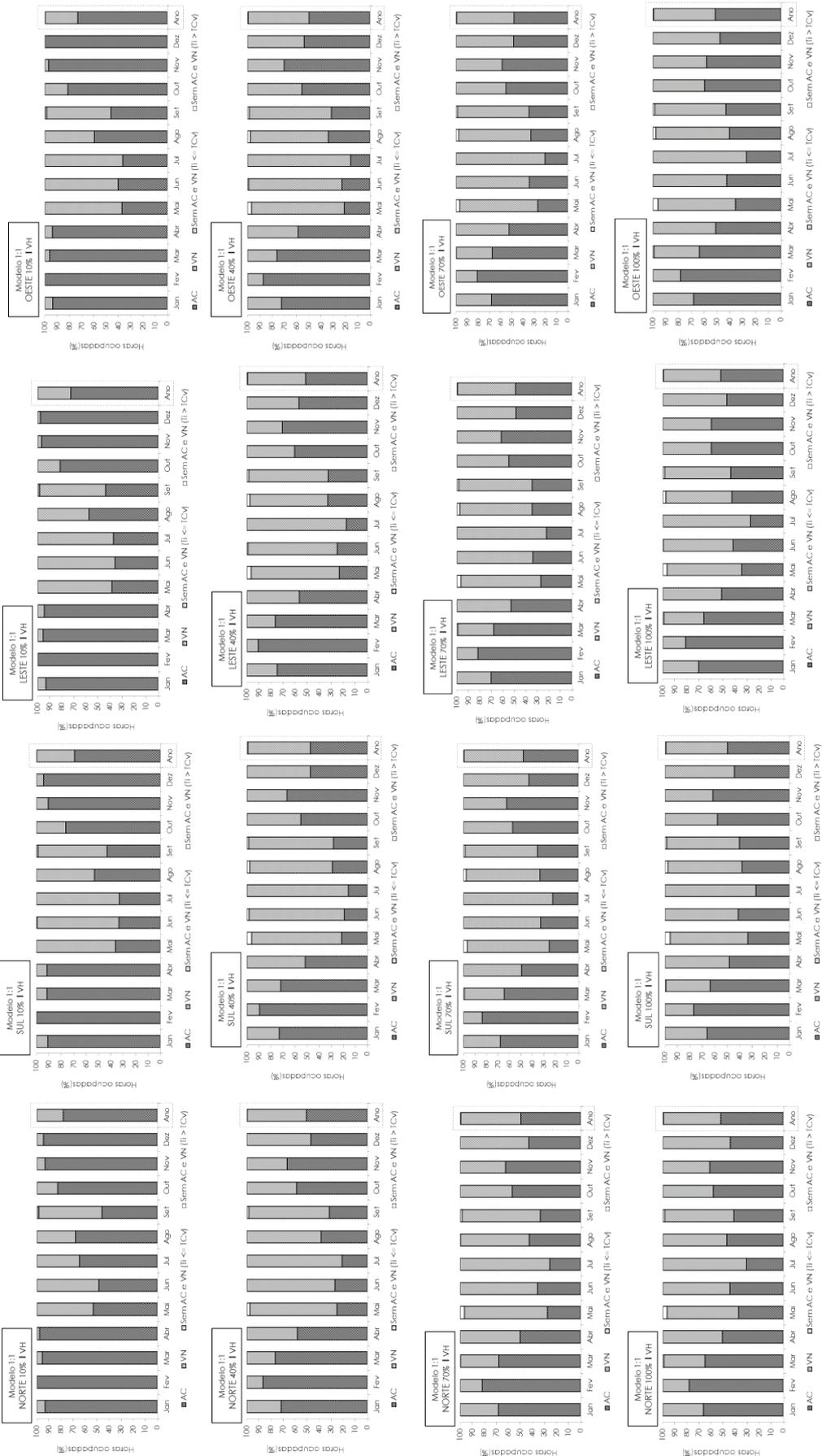
Fonte: Elaborada a partir de Buildings (2016)

conclusão

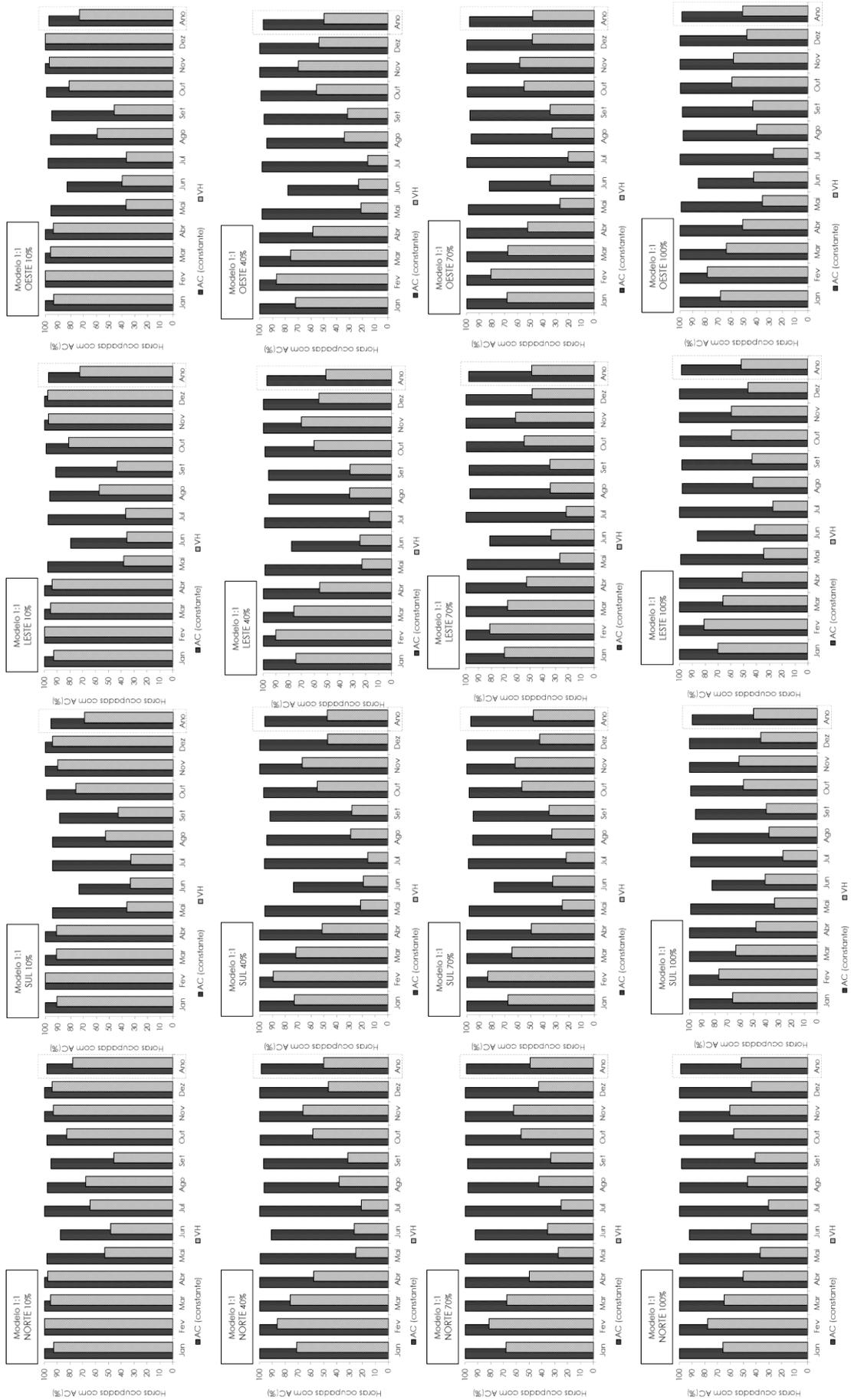
APÊNDICE B – Dados de saída pedidos no EnergyPlus para as simulações

<i>AFN Surface Venting Availability Status</i>
<i>AFN Surface Venting Window or Door Opening Factor</i>
<i>AFN Zone Infiltration Air Change Rate</i>
<i>AFN Zone Infiltration Sensible Heat Gain Rate</i>
<i>AFN Zone Infiltration Sensible Heat Loss Rate</i>
<i>AFN Zone Infiltration Volume</i>
<i>Availability Manager Hybrid Ventilation Control Mode</i>
<i>Availability Manager Hybrid Ventilation Control Status</i>
<i>Lights Electric Energy</i>
<i>Site Outdoor Air Drybulb Temperature</i>
<i>Site Wind Speed</i>
<i>Surface Inside Face Conduction Heat Transfer Rate</i>
<i>Zone Electric Equipment Electric Energy</i>
<i>Zone Electric Equipment Total Heating Rate</i>
<i>Zone Ideal Loads Supply Air Total Cooling Rate</i>
<i>Zone Ideal Loads Supply Air Total Heating Energy</i>
<i>Zone Ideal Loads Supply Air Total Heating Rate</i>
<i>Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy</i>
<i>Zone Lights Total Heating Rate</i>
<i>Zone Mean Air Temperature</i>
<i>Zone Operative Temperature</i>
<i>Zone People Total Heating Rate,</i>
<i>Zone Windows Total Heat Gain Rate</i>
<i>Zone Windows Total Heat Loss Rate</i>
<i>Zone Windows Total Transmitted Solar Radiation Rate</i>

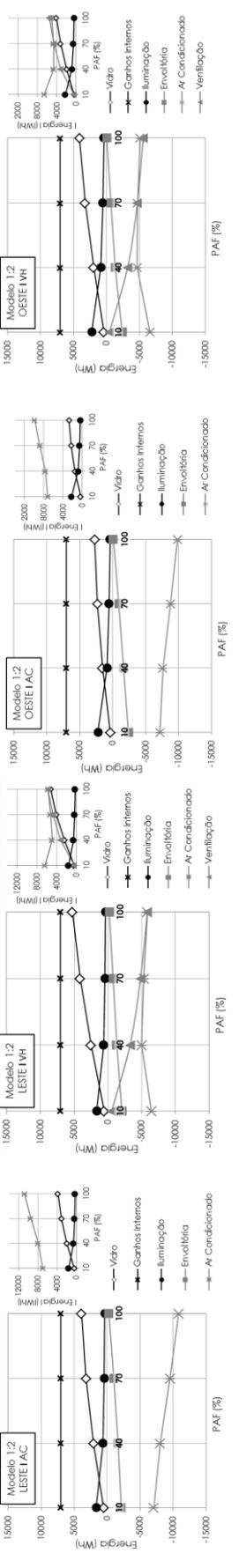
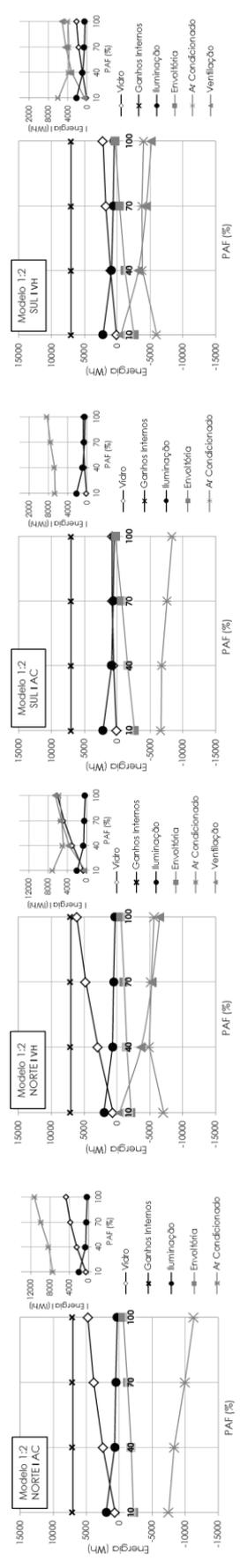
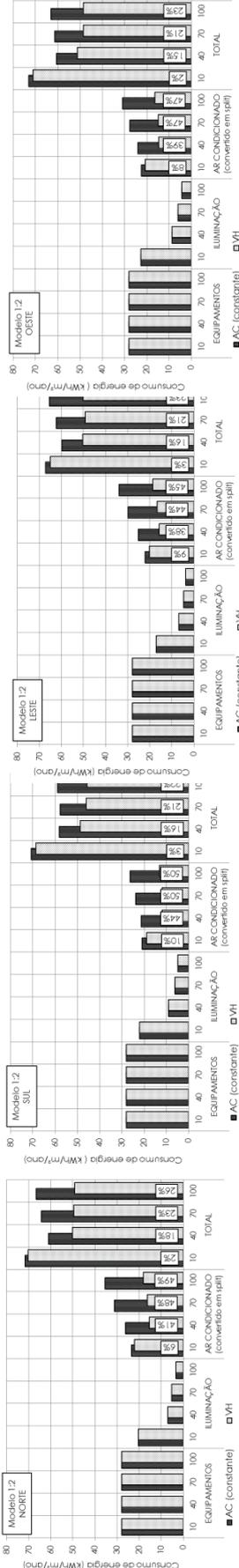
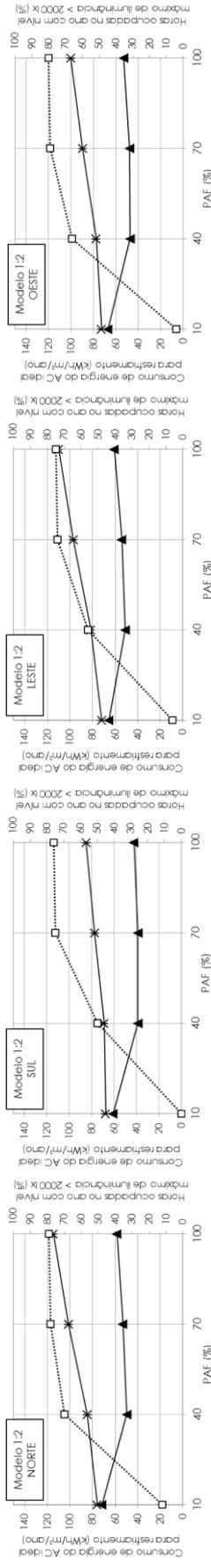
MODELO 1:1



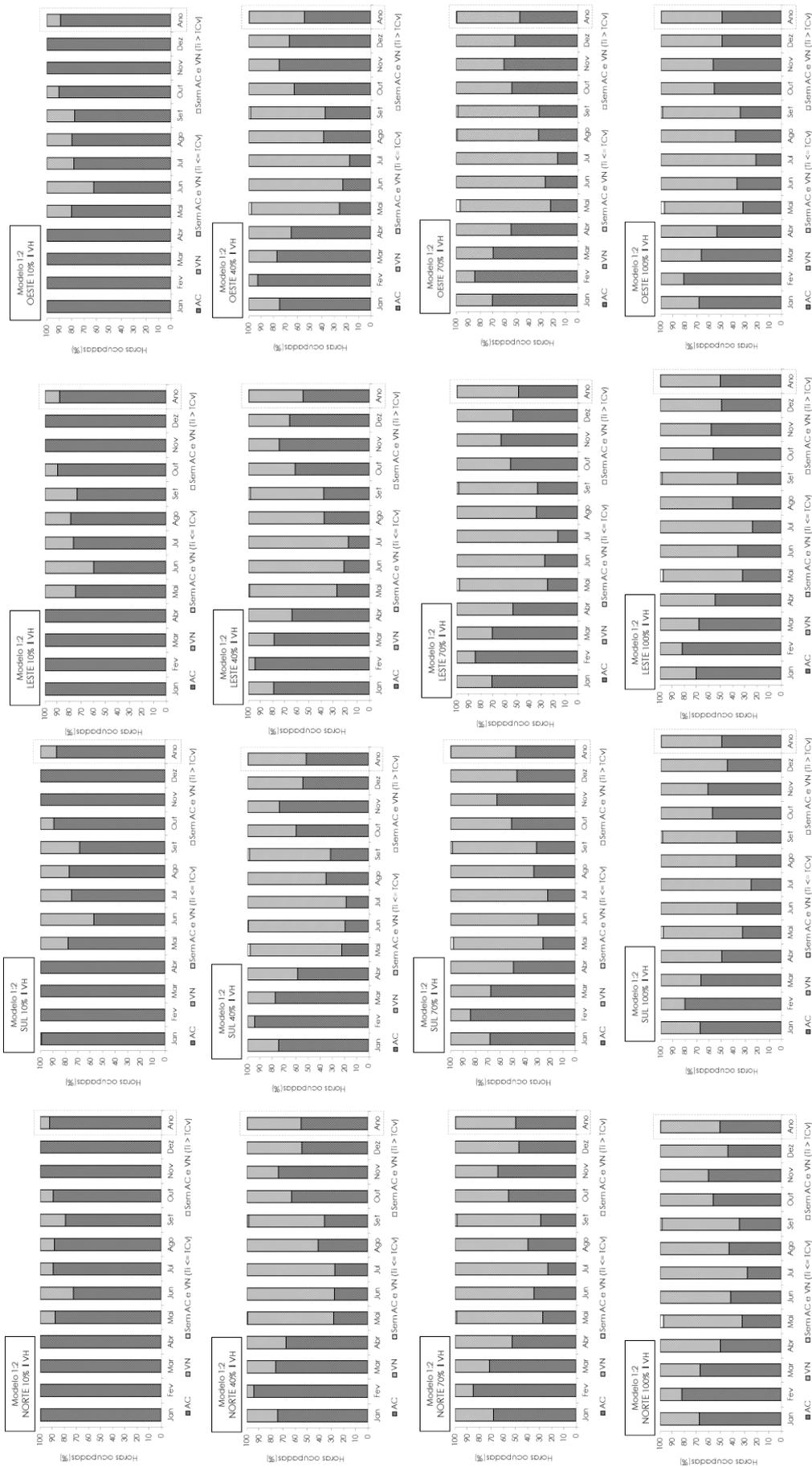
MODELO 1:1



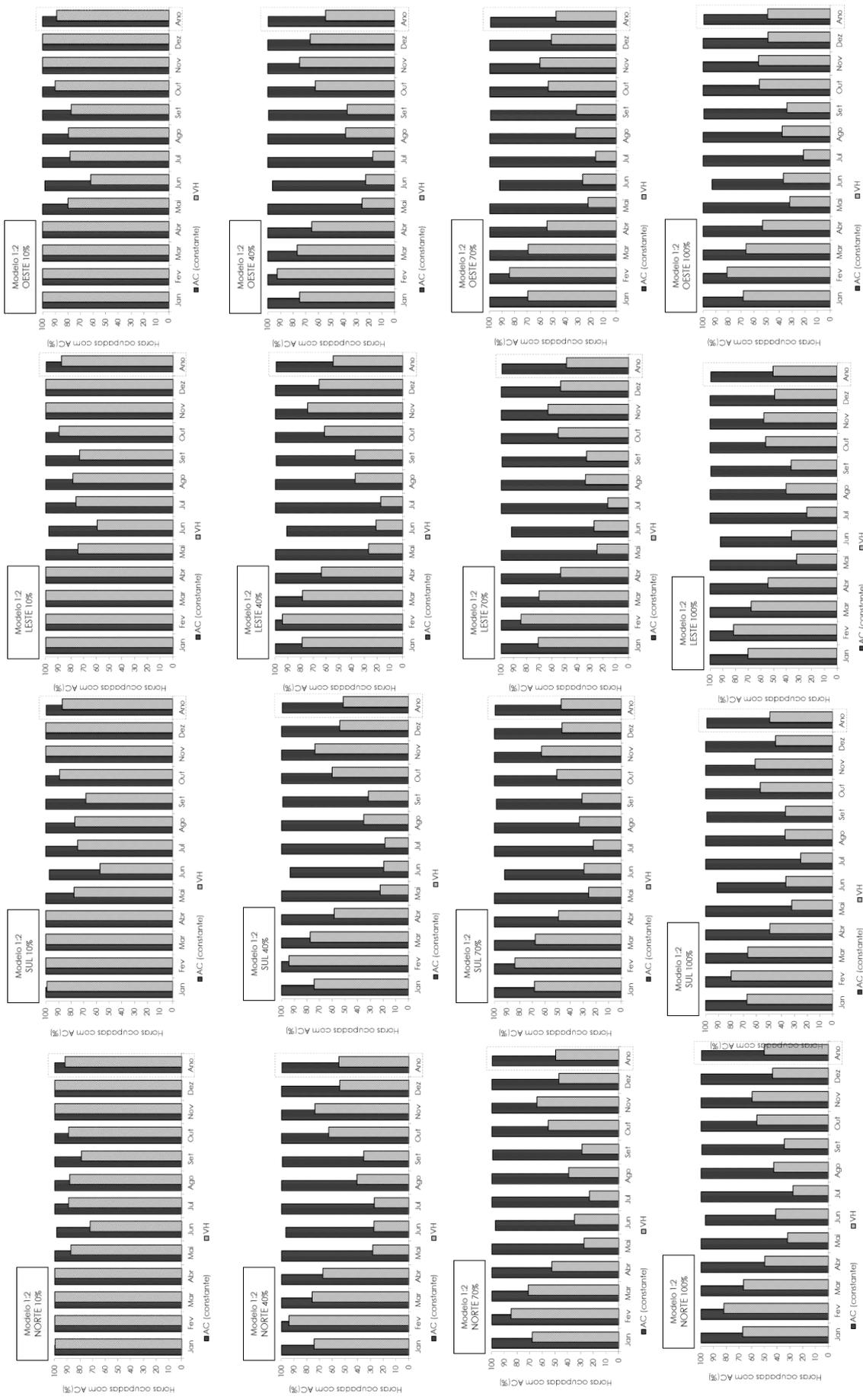
MODELO 1:2



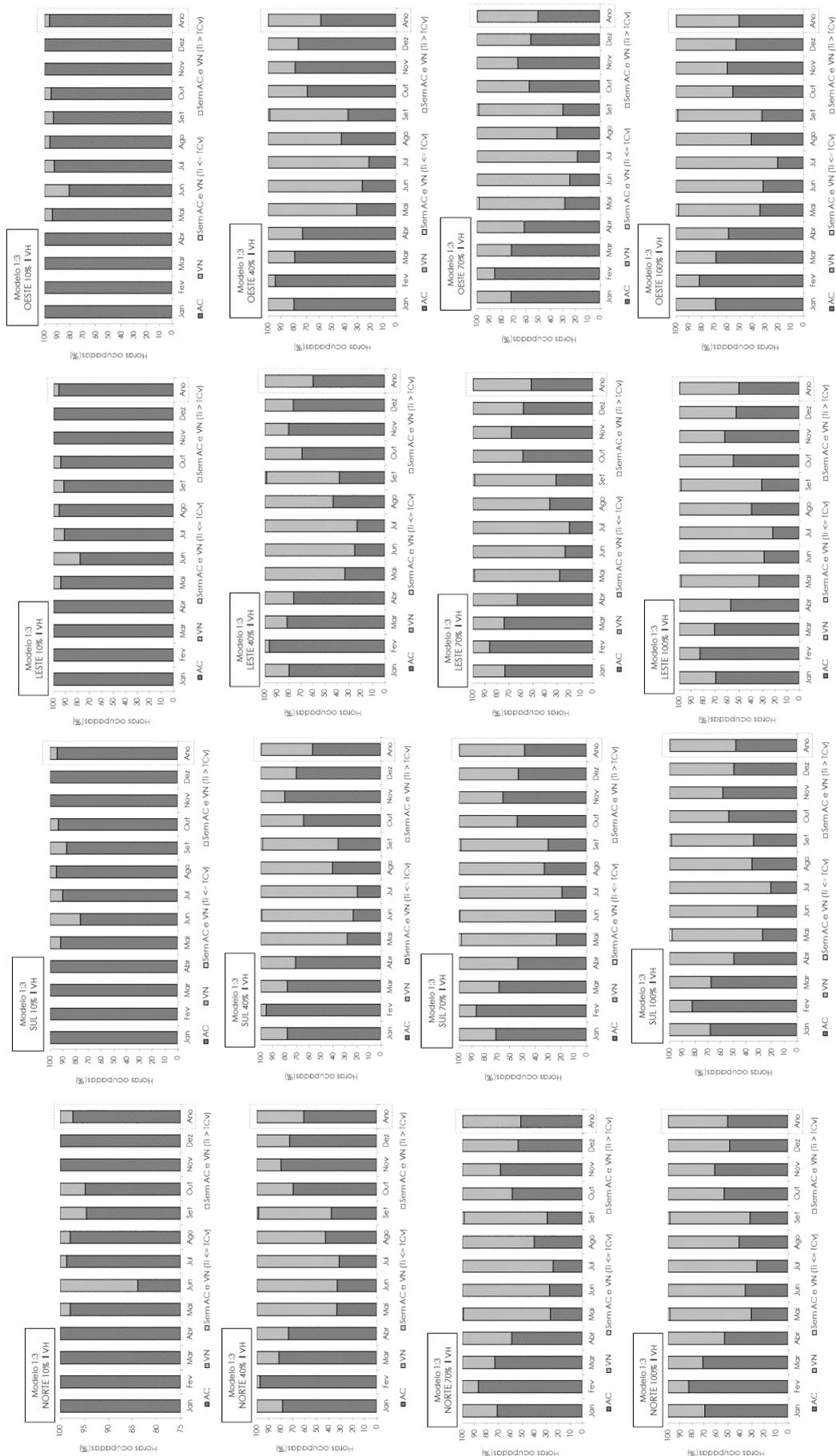
MODELO 1:2

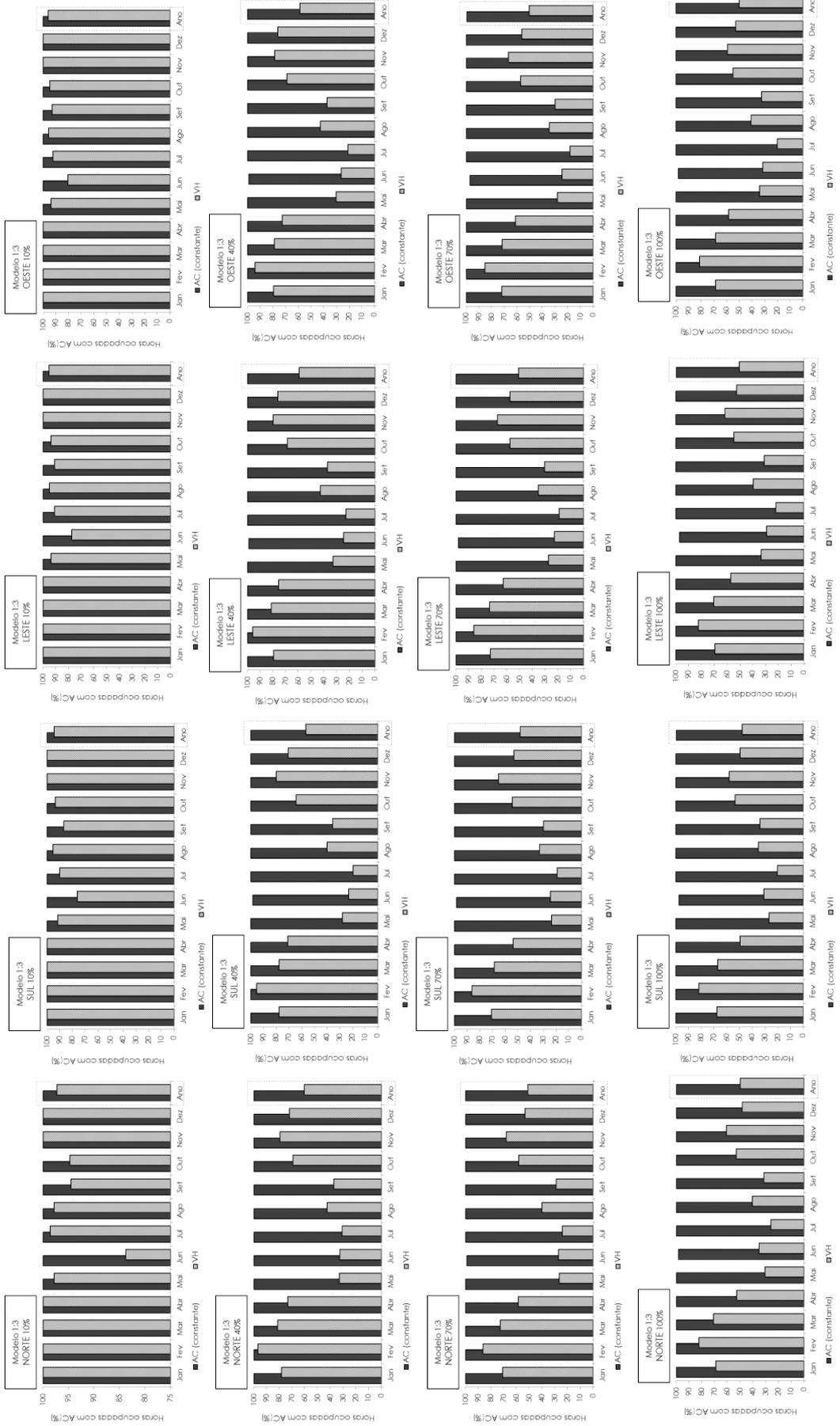


MODELO 1:2

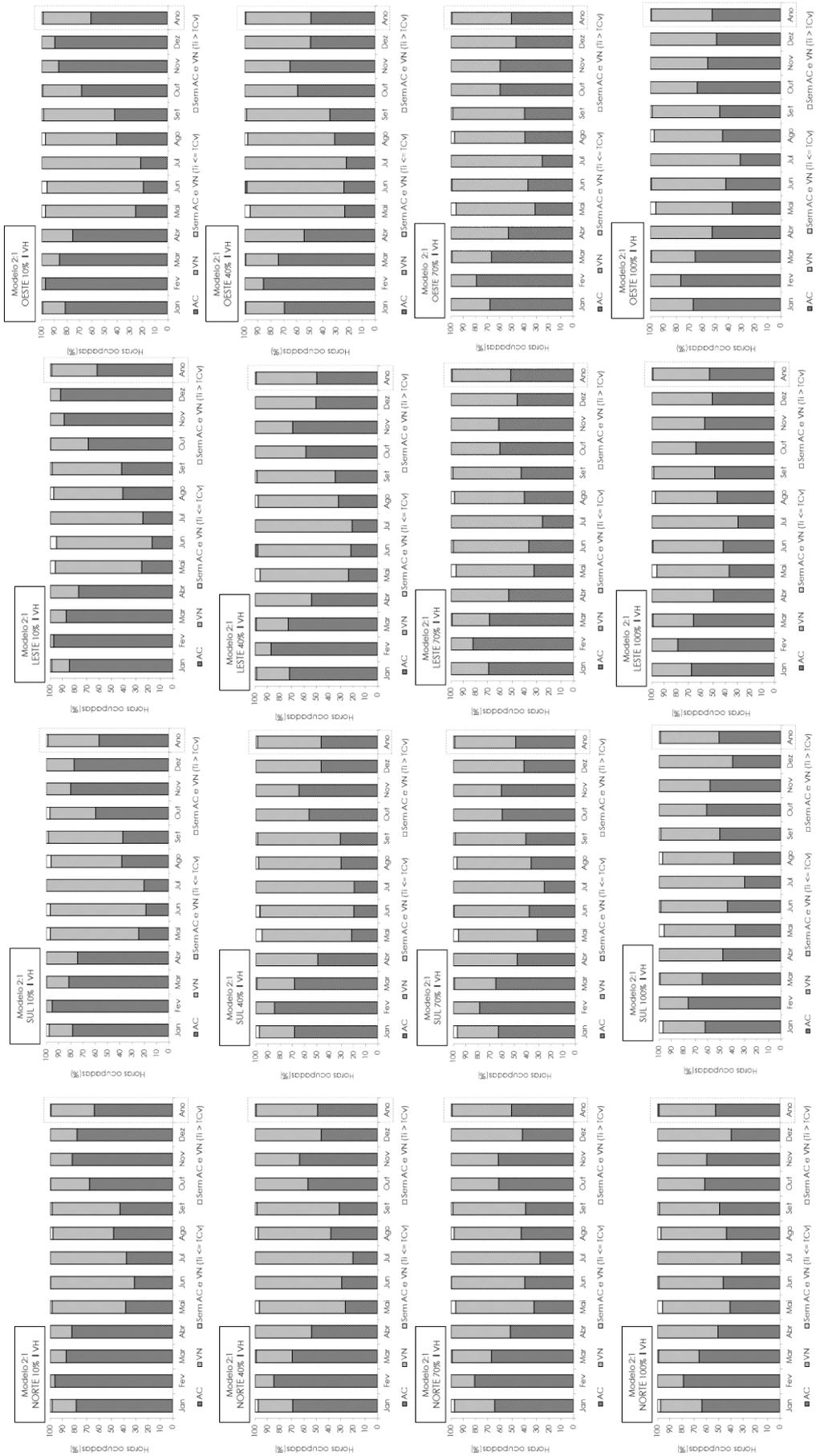


MODELO 1:3

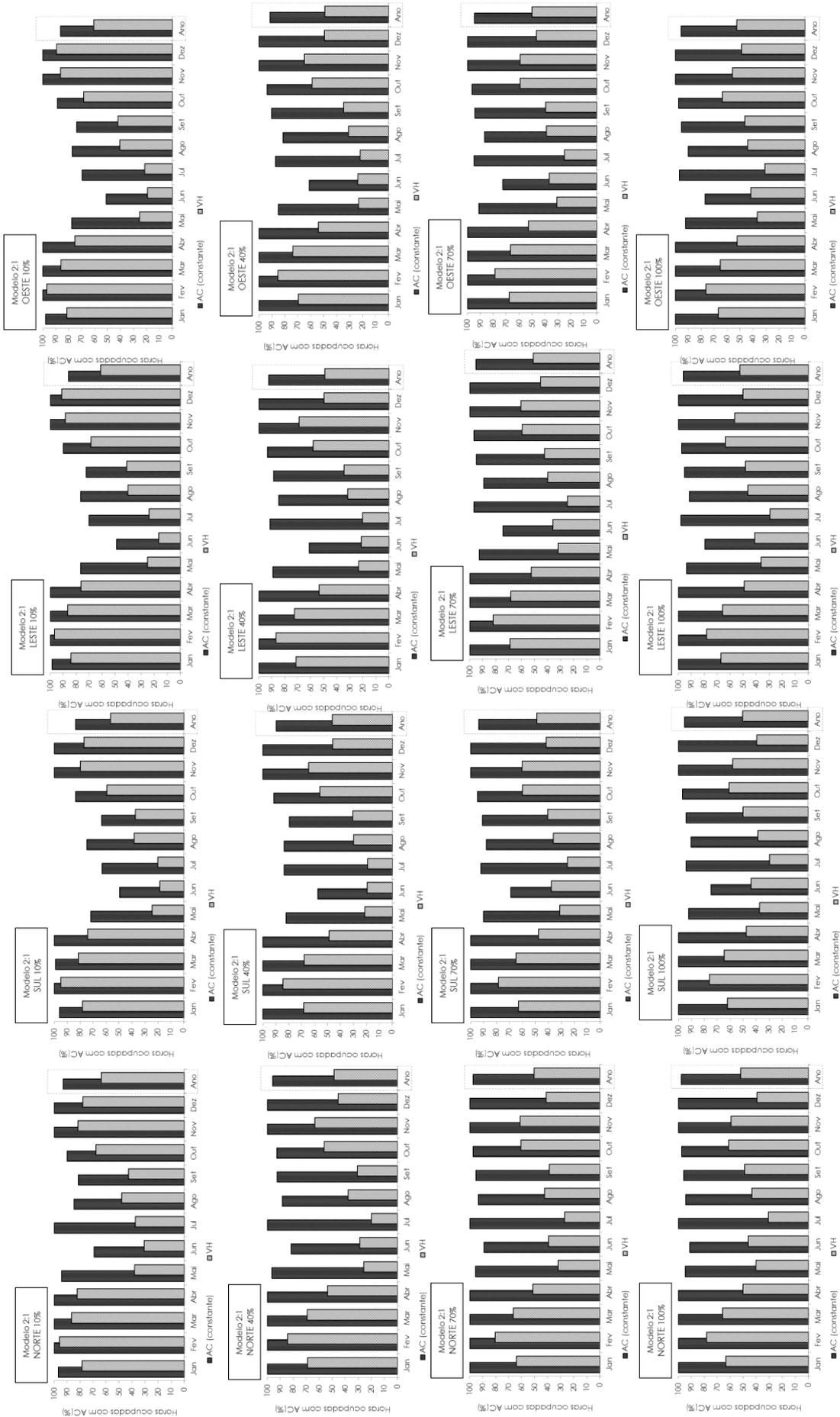




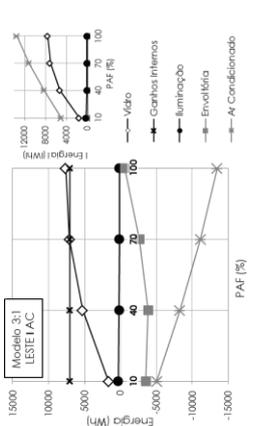
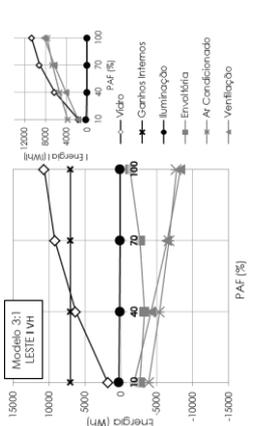
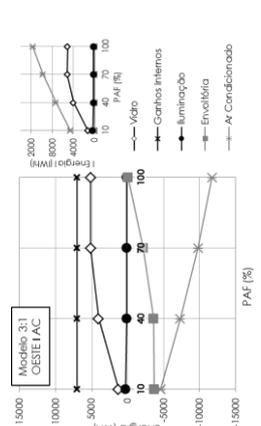
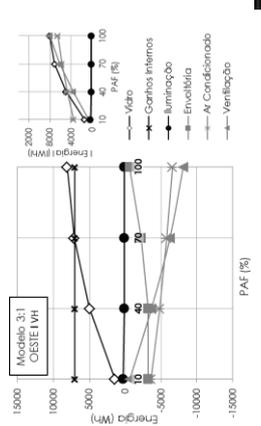
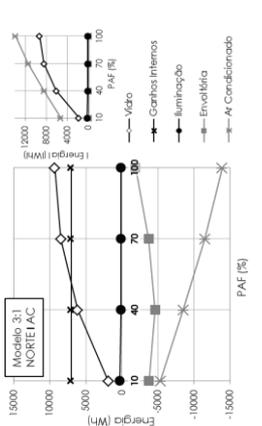
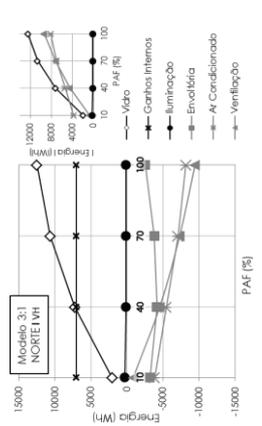
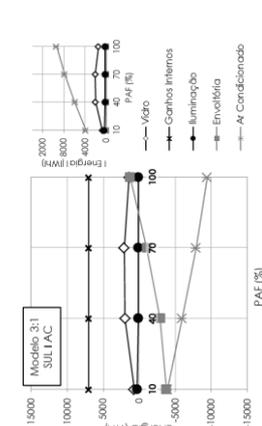
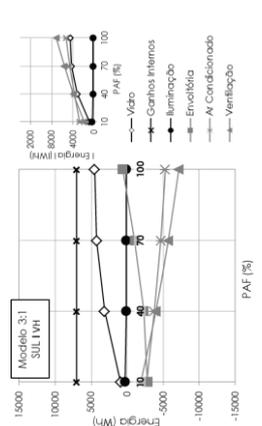
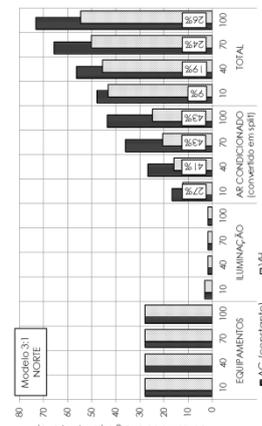
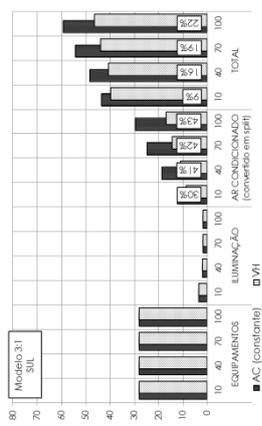
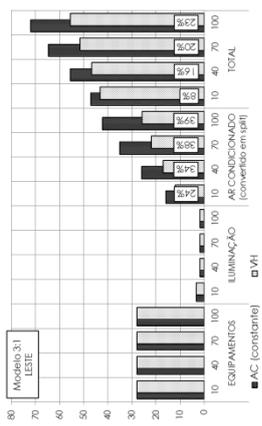
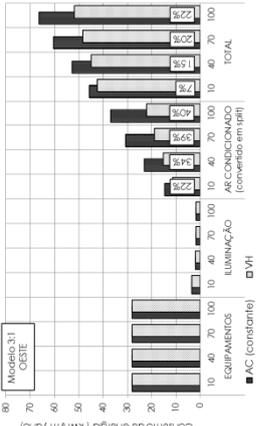
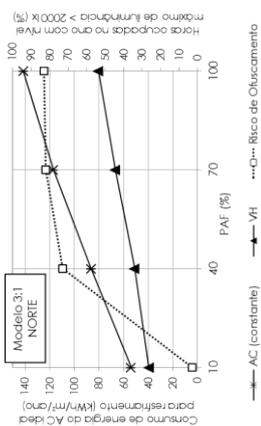
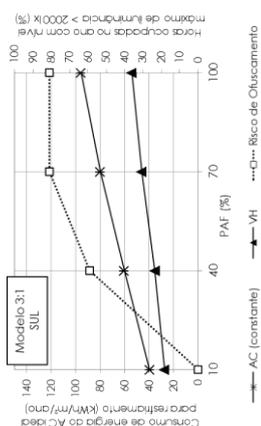
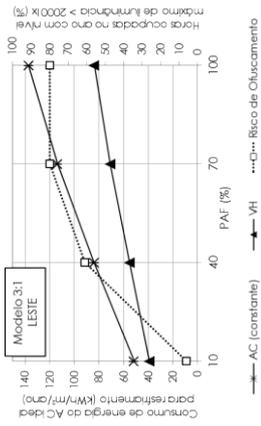
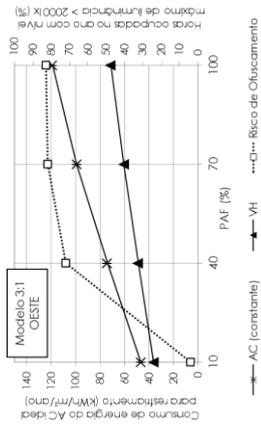
MODELO 2:1



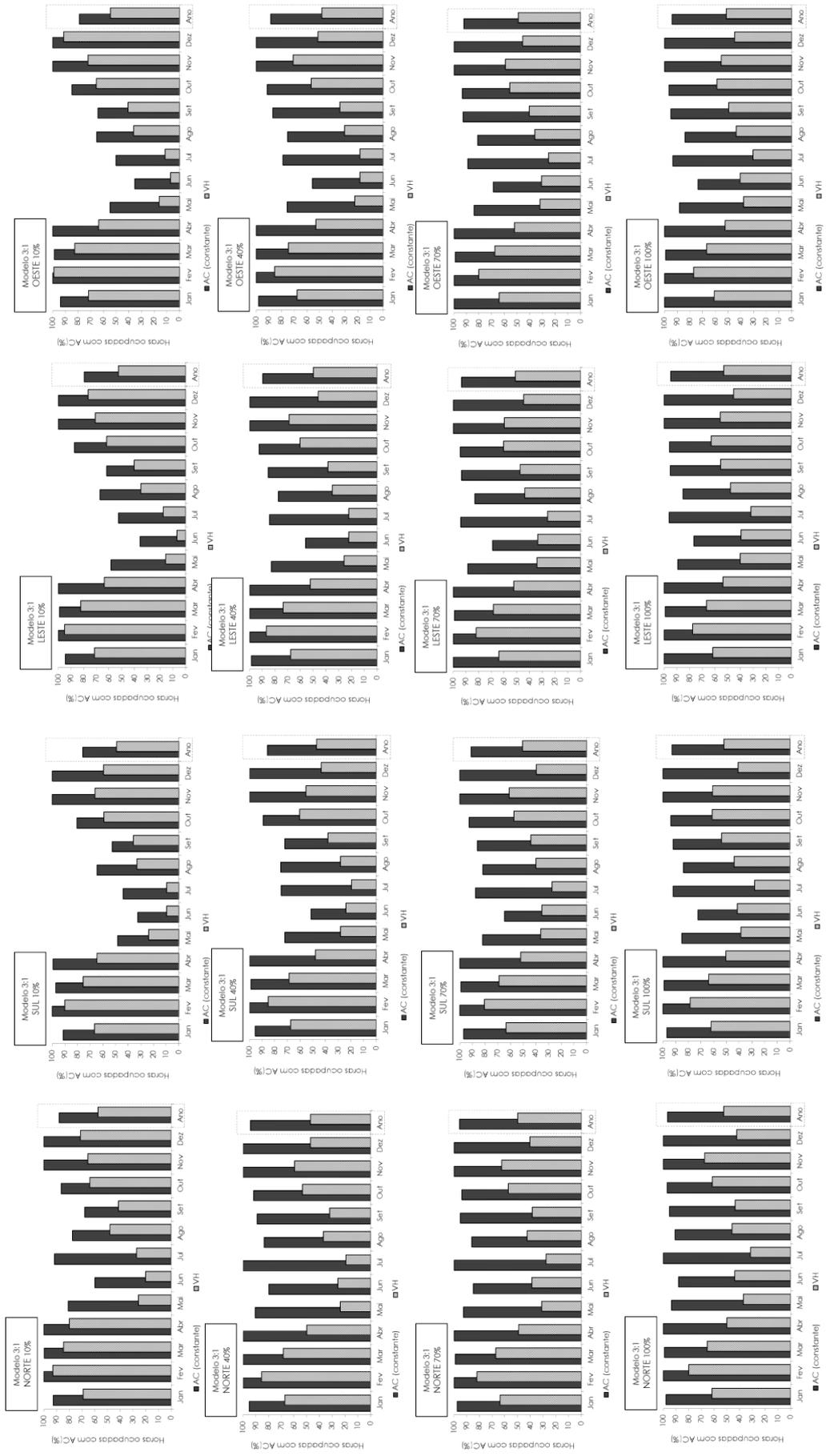
MODELO 2:1



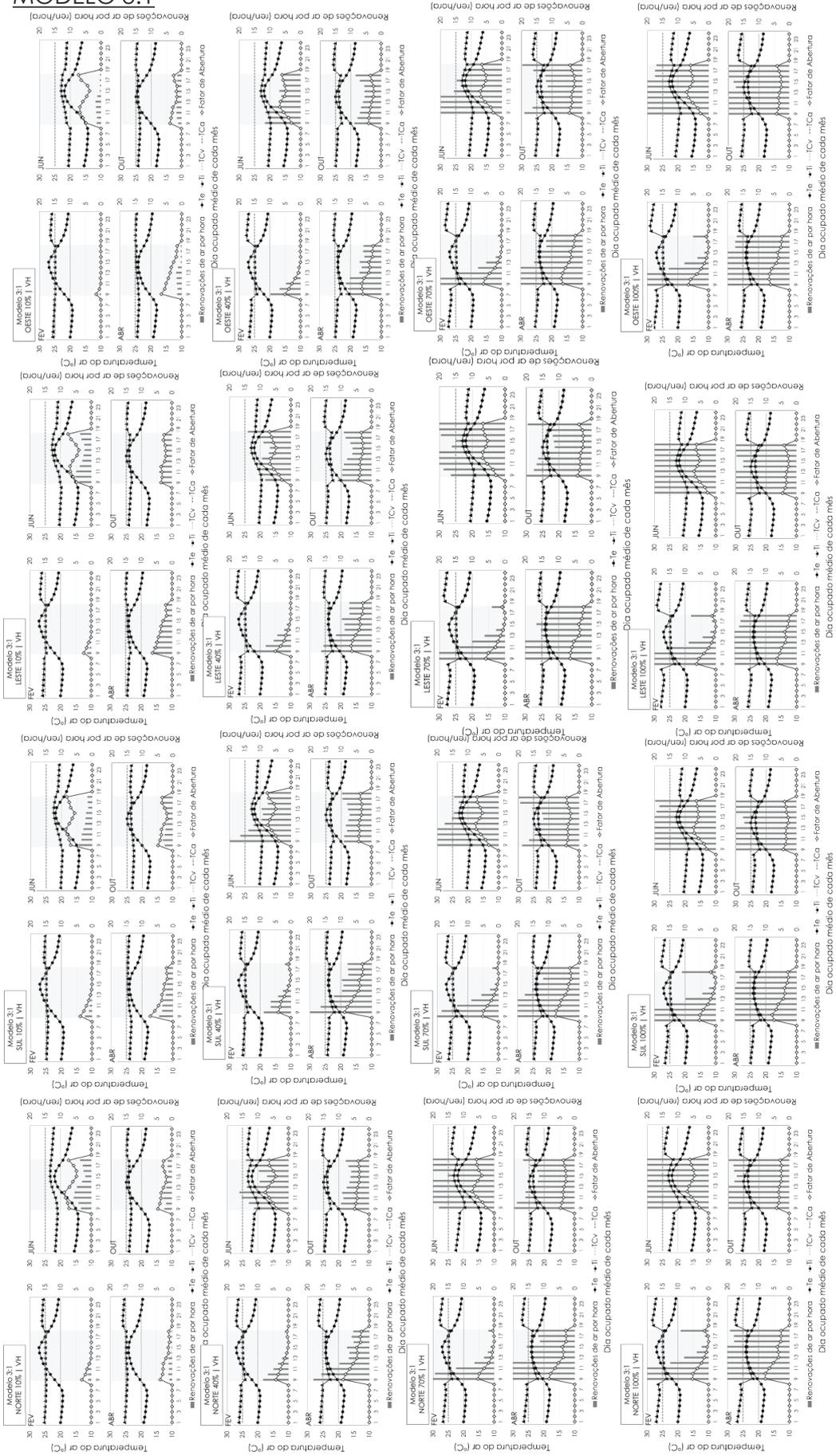
MODELO 3:1

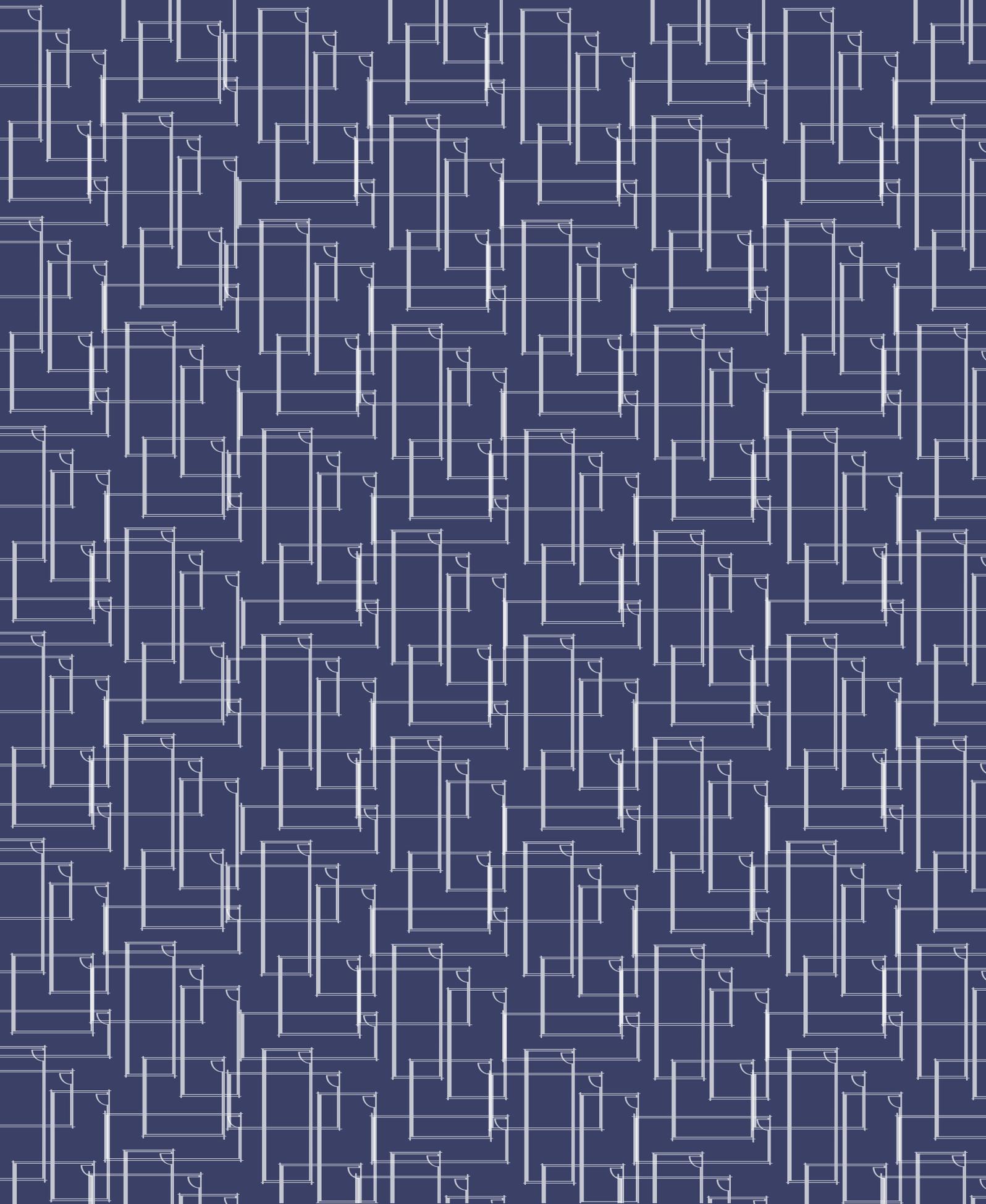


MODELO 3:1



MODELO 3:1





USP



instituto de
arquitetura
e urbanismo
usp são carlos

