

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
RESIDÊNCIAS EM FLORIANÓPOLIS UTILIZANDO A VENTILAÇÃO
NATURAL**

**Dissertação submetida à Universidade Federal
de Santa Catarina como requerimento parcial
exigido pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil – PPGEC, para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.**

MICHELE MATOS

Florianópolis, dezembro de 2007.

Ficha catalográfica

M382s

MATOS, Michele

Simulação computacional do desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural. / Michele Matos. – Florianópolis : UFSC, 2007.

106 f.; il

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2007.

Orientador: Roberto Lamberts

1. Simulação computacional. 2. Dados climáticos. 3. Desempenho térmico. 4. Ventilação natural. 5. Florianópolis. 6. Edificação residencial. I. Lamberts, Roberto (Orient.). II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 621.56(81)

Bibliotecária: Roseli Alves Madeira Westphal

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE RESIDÊNCIAS EM FLORIANÓPOLIS UTILIZANDO A VENTILAÇÃO NATURAL

MICHELE MATOS

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Prof. Glicério Trichês, Dr. – Coordenador do PPGEC

Prof. Roberto Lamberts, PhD. – Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Roberto Lamberts, PhD. – Moderador – ECV/ UFSC

Prof. Aldomar Pedrini, PhD. – ARQ/UFRN

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD. – ARQ/ UFSC

Prof. EneDir Ghisi, PhD. – ECV/ UFSC

Prof^a. Solange V. G. Goulart, PhD. – ECV/ UFSC

RESUMO

Neste trabalho, o desempenho térmico do projeto de uma residência unifamiliar foi analisado através de simulação computacional. A definição das estratégias para as simulações seguiu as recomendações da NBR 15220 para a zona bioclimática 3. As alternativas adotadas nas simulações consistiram em alterar a área de ventilação; sombrear as janelas; variar a transmitância térmica de paredes e cobertura; verificar a influência da orientação no desempenho térmico das residências e variar a absorvância de paredes e cobertura. Além disso, foram definidas diferentes estratégias de ventilação. A ventilação natural foi simulada através do módulo *AirflowNetwork*, integrado ao programa *EnergyPlus*. O desempenho térmico das alternativas foi quantificado através de graus-hora de desconforto com relação à temperatura operativa para a sala e um dos dormitórios durante as horas de ocupação. Considerando-se os resultados obtidos através das simulações, pode-se dizer que a área de abertura de 15% com relação à área de piso visando à ventilação natural foi a mais adequada para esse tipo de residência. A estratégia de sombreamento das janelas durante o verão foi uma alternativa eficaz para a redução das temperaturas internas durante esse período. A área mínima de abertura requerida para a ventilação natural no código de obras de Florianópolis (8% da área de piso) resultou no pior desempenho mesmo sombreada. A limitação do atraso térmico estabelecido pela NBR 15220 não se justifica, na medida em que todas as paredes com transmitância dentro dos limites da norma apresentaram quantidades de graus-hora semelhantes. As paredes muito leves apresentaram desempenho inferior ao das paredes simuladas com capacidade térmica e transmitância limitada pela norma. A parede de concreto com 5 cm de espessura, configurou a pior hipótese de vedação para a residência. A NBR 15220 limita, através do Fator de Calor Solar, o valor da absorvância das paredes do caso base em 36% e essa limitação é benéfica para o desempenho térmico da residência. Por outro lado, o limite de FCS estabelecido pela norma para coberturas, não limitou a absorvância das coberturas simuladas, com exceção da cobertura de telha de fibrocimento. Porém, observou-se que as coberturas escuras possuem desempenho muito inferior às coberturas claras. A limitação da absorvância constitui-se numa importante estratégia para a diminuição da quantidade de graus-hora para a residência. Quando as janelas da residência estavam fechadas, a quantidade de trocas de ar de maior ocorrência durante o ano foi a de uma vez o volume do ambiente. E quando as janelas estavam abertas, na maioria das vezes em que houve a ventilação, esses valores foram de até 20 ou 30 trocas de ar por hora.

ABSTRACT

In this research, the thermal performance of a single family house was evaluated by using computer simulation, through the EnergyPlus program. Building envelope (type of wall, roof and floor); external colors; opening area and ventilation strategies were varied in the model. The NBR 15220 recommendations for the Florianopolis city climate were applied in the simulation. The natural ventilation in the interior of the dwelling and the air exchange between rooms had been simulated with AirFlowNetwork algorithm. The thermal performance of the building was quantified through degree-hours of discomfort for the living room and the bedroom during occupation time. Ventilation area of 15% of the floor area presented the best results. The use of solar protections in the openings during the summer period was an effective alternative for reducing internal temperatures during this period. The minimum ventilation area of 8% required for The Construction Regulations for the city of Florianopolis presented the worst results, even with the use of shading devices. The limitation of the delaying of the thermal flow established by the NBR 15220 is not justified, because all the walls with U-factor within the limits of the standard presented significant amounts of similar degree-hours. The walls simulated with thermal capacity, with limited U-factor of the standard, presented better performance than the light weight walls. The 5 cm concrete wall set up the worst alternative for the model. The NBR 15220 Standard restricts, by the use of the Solar Heat Factor (FCS), the value of the exterior absorptance of the walls of the base case by 36% and this limitation is beneficial for the thermal performance of the building. However, the limitation of the FCS for the roofs, did not restrict the exterior absorptance for the simulated roofs, one exception was the fiber-cement roofing. Although, it was noticed that dark roofs have very worse performance than clear roofs. For that reason, the limitation of external absorptance constitutes an important strategy for reducing the amount of degree-hours for the house. When the windows were closed, the amount of air exchanges of highest occurrence during the year was once the volume of the room. And when the windows were open, most times when there was ventilation, these values were until 20 or 30 air changes per hour.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.1.1	OBJETIVO GERAL	3
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.2	JUSTIFICATIVAS	4
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DE FLORIANÓPOLIS	9
2.2	INTERAÇÃO DOS OCUPANTES COM OS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO	12
2.3	MECANISMOS DE VENTILAÇÃO NATURAL	14
2.3.1	DIFERENÇA DE PRESSÃO CAUSADA PELO VENTO	14
2.3.2	DIFERENÇA DE PRESSÃO CAUSADA POR DIFERENÇA DE TEMPERATURA	19
2.3.3	FLUXO DE AR ATRAVÉS DE ABERTURAS	20
2.3.4	FLUXO DE AR ATRAVÉS DE FRESTAS	21
2.4	TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TAXAS DE VENTILAÇÃO E INFILTRAÇÃO	23
2.5	TÉCNICAS DE CÁLCULO DE TAXAS DE VENTILAÇÃO E INFILTRAÇÃO	27
2.5.1	MÉTODOS EMPÍRICOS	27
2.5.2	MÉTODOS TEÓRICOS SIMPLIFICADOS	33
2.5.3	MODELOS ZONAIS E DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL – CFD	34
2.5.4	MODELOS DE REDE	35
2.6	RESUMO DO CAPÍTULO	42
3	METODOLOGIA	44
3.1	INTRODUÇÃO	45
3.2	DEFINIÇÃO DO CASO BASE	45
3.2.1	GEOMETRIA	46
3.2.2	ENVELOPE	46
3.2.3	OCUPAÇÃO	47
3.2.4	ILUMINAÇÃO	48
3.2.5	EQUIPAMENTOS	50
3.2.6	VENTILAÇÃO	51

3.3	ALTERNATIVAS DE SIMULAÇÃO	53
3.3.1	ORIENTAÇÃO DOS MODELOS	53
3.3.2	TIPOS DE COBERTURA	54
3.3.3	TIPOS DE PAREDES	55
3.3.4	ÁREA DE JANELA E ABERTURA PARA VENTILAÇÃO	57
3.3.5	VENTILAÇÃO	57
3.3.6	SOMBREAMENTO DAS ABERTURAS	58
3.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
3.5	RESUMO DO CAPÍTULO	61
4	RESULTADOS	63
4.1	INTRODUÇÃO	64
4.2	CASO BASE	64
4.2.1	TEMPERATURAS DO AR E FLUXOS DE CALOR	65
4.2.2	VENTILAÇÃO	68
4.3	SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS	74
4.3.1	ANÁLISE DA COBERTURA	75
4.3.2	ANÁLISE DA ORIENTAÇÃO	77
4.3.3	ANÁLISE DA PAREDE	78
4.3.4	ANÁLISE DA VENTILAÇÃO	80
4.4	CONSIDERAÇÕES	84
5	CONCLUSÕES	89
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Carta bioclimática para a cidade de Florianópolis. _____	10
Figura 2 - Frequência de ocorrência dos ventos para a cidade de Florianópolis no arquivo TRY. (Fonte: LabEEE, 2005) _____	11
Figura 3 – Velocidades predominantes do vento por direção para a cidade de Florianópolis no arquivo TRY. (Fonte: LabEEE, 2005) _____	11
Figura 4 – Frequência de ocorrência das temperaturas de bulbo seco do TRY (Fonte: GOULART et al., 1998). _____	11
Figura 5 - Diferença de pressão causada pelo vento _____	14
Figura 6 - Fluxograma do algoritmo para o cálculo da velocidade do vento em <i>canyons</i> urbanos. Fonte: Georgakis & Santamouris (2005). _____	19
Figura 7 - Diferença de pressão causada por diferença de temperatura. _____	20
Figura 8 - Esquema da rede de nós de pressão de um modelo de duas zonas. _____	38
Figura 9. Janela ou porta mostrando os fatores geométricos associados a uma abertura pela qual o ar passa. _____	40
Figura 10 – Relação entre os tipos de controle e <i>schedules</i> de controle. _____	42
Figura 11 – Planta baixa do caso base. _____	46
Figura 12 – Corte da parede em bloco cerâmico. _____	46
Figura 13 – Corte da cobertura em laje e fibrocimento. _____	47
Figura 14 – Área de abertura para ventilação de 8% da área do piso. _____	47
Figura 15 - Padrões de ocupação da unidade 1, dias úteis (esquerda) e finais de semana (direita). _____	48
Figura 16 - Padrões de uso em iluminação para os dias úteis (esquerda) e para os finais de semana (direita). _____	49
Figura 17 – Obstáculos criados no programa <i>CP Generator</i> para o cálculo dos coeficientes de pressão. _____	52
Figura 18 – Diferentes orientações para o caso base. _____	54
Figura 19 - Cobertura composta por telha de barro, alumínio polido e forro de concreto. _____	54
Figura 20 - Cobertura de telha de barro com lâ de vidro sobre forro de madeira. _____	55
Figura 21 - Cobertura de telha de fibro-cimento sem forro. _____	55
Figura 22 - Parede de concreto maciço. _____	56

Figura 23 - Parede de tijolos de oito furos quadrados, assentados na maior dimensão. _____	56
Figura 24 - Parede dupla de tijolos de 8 furos circulares, assentados na maior dimensão. _____	56
Figura 25 – Alternativas de área de abertura para iluminação e ventilação. _____	57
Figura 26 – Temperatura horária para representação de graus-hora de aquecimento e resfriamento. _____	60
Figura 27 - Valores de temperatura horária do ar interno e externo para o dia 8 de janeiro. _____	65
Figura 28 - Fluxo de calor horário para o dia 8 de janeiro. _____	66
Figura 29 - Valores de temperatura horária do ar interno e externo para o dia 6 de agosto. _____	67
Figura 30 - Fluxo de calor horário para o dia 6 de agosto. _____	68
Figura 31 - Velocidade e direção do vento e trocas de ar por hora para o dia 8 de janeiro. _____	70
Figura 32 - Trocas de ar por hora e velocidade e direção do vento para o dia 6 de agosto. _____	73
Figura 33 – Frequência de ocorrência de trocas de ar anual para o caso base. _____	74
Figura 34 – Valores de graus-hora de inverno e verão para o dormitório e para a sala, variando a absorvância da cobertura do caso base. _____	75
Figura 35 – Valores de graus-hora anual para o dormitório e para a sala, e valores de graus-hora total variando a absorvância da cobertura do caso base. _____	76
Figura 36 – Resultados por período e ambiente para diferentes transmitâncias de coberturas. _____	77
Figura 37 – Resultados anuais por ambiente para diferentes transmitâncias e absorvâncias de coberturas. _____	77
Figura 38 – Valores de graus-hora de inverno e verão para o dormitório e para a sala, variando a orientação do modelo. _____	78
Figura 39 – Valores de graus-hora de inverno e verão para a sala e para o dormitório para diferentes absorvâncias de parede. _____	79
Figura 40 – Valores de graus-hora anual para a sala e para o dormitório para diferentes absorvâncias de parede. _____	79
Figura 41 - Valores de graus-hora de inverno e verão para a sala e para o dormitório para diferentes transmitâncias de parede. _____	80
Figura 42 – Valores de graus-hora anual para a sala e para o dormitório para diferentes transmitâncias de parede. _____	80
Figura 43 – Valores de graus-hora em função da área de abertura para ventilação. _____	81
Figura 44 – Resultados anuais para a sala e para o dormitório em função da área de abertura e sombreamento. _____	82

Figura 45 - Resultados anuais para a sala e para o dormitório para diferentes estratégias de ventilação em função da área de abertura sem sombreamento. _____ 83

Figura 46 – Resultados para o período de verão para a sala e para o dormitório para diferentes estratégias de ventilação em função da área de abertura com sombreamento. _____ 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fração das horas do ano nas quais a estratégia bioclimática mais adequada é a ventilação natural.	9
Tabela 2 – Temperaturas Média das máximas e Média das mínimas (°C). Fonte: Goulart et al. (1998).	12
Tabela 3 – Valores de expoente e camada limite para diferentes categorias de terreno. Fonte: ASHRAE (2001).	16
Tabela 4 - Valores de expoente e camada limite para diferentes categorias de terreno. Fonte: AIVC (2005).	16
Tabela 5 – Valores de n e C_Q para diferentes tipos de frestas. Fonte: Liddament (1986).	22
Tabela 6 - Unidades habitacionais por faixa de renda média familiar. Fonte: Tavares(2006)	45
Tabela 7 - Densidade de potência em iluminação instalada em cada ambiente da unidade 1.	50
Tabela 8 - Potência média dos equipamentos, tempo médio de utilização e consumo médio mensal e diário.	50
Tabela 9 - Valores de coeficientes de descarga, fator de largura, fator de altura e altura inicial de abertura de acordo com o fator de abertura.	51
Tabela 10 – Valores dos coeficientes de pressão utilizados nas simulações.	52
Tabela 11 – Valores de comprimento de fresta adotados para cada área de abertura para ventilação na tentativa de representar uma veneziana.	60
Tabela 12 – Resumo das alternativas de simulação.	62
Tabela 13 – Velocidades do vento de maior frequência de ocorrência por períodos do dia e estações do ano.	69
Tabela 14 - Frequência de não ocorrência de ventos.	69
Tabela 15 – Valores máximos de ventilação para o dia 8 de janeiro.	71
Tabela 16 – Valores máximos de infiltração para o dia 8 de janeiro.	71
Tabela 17 - Valores máximos de infiltração para o dia 6 de agosto.	72

A large, light gray decorative letter 'I' with elegant flourishes. A solid blue vertical bar is positioned over the stem of the 'I'. A smaller, blue, stylized letter 'I' is placed on the blue bar.

Capítulo I

*I*ntrodução

Atualmente, a sociedade brasileira vem apresentando uma grande preocupação com o setor energético nacional. Em todos os segmentos, busca-se, a cada dia, a otimização dos recursos energéticos através da redução do consumo, seja isso feito por meio de conscientização ou pela aplicação de tecnologias e conceitos de eficiência energética.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2003), o setor residencial representava 22% do consumo de energia elétrica no país. Grande parte das residências brasileiras ainda não possui aparelhos condicionadores de ar. Para aumentar o conforto térmico a maioria da população utiliza a ventilação natural e a ventilação mecânica (aparelhos circuladores de ar e ventiladores). A otimização do sistema de ventilação natural em residências de países de clima quente, como o Brasil, pode contribuir para a diminuição do consumo de aparelhos condicionadores de ar, o que traz benefícios ao usuário e à sociedade em geral. Os benefícios podem vir da redução de custos com energia elétrica, da redução das penalidades pelo uso da energia e do aumento do conforto térmico.

A ventilação natural é uma estratégia importante na busca do conforto térmico para os países em desenvolvimento que possuem clima quente e úmido. O aumento da velocidade do ar, até certos limites, reforça a sensação de resfriamento através do acréscimo da taxa de evaporação na superfície da pele. Além de proporcionar o conforto térmico dos ocupantes, contribui para a higiene dos ambientes e para o aumento dos coeficientes de convecção das superfícies da estrutura da edificação. Com relação à higiene dos ambientes, a ventilação remove as impurezas dos mesmos, renovando o ar interno, o que colabora para a saúde dos ocupantes. A ventilação noturna é uma maneira de diminuir a temperatura da estrutura da edificação para o dia seguinte, quando a massa interna refrigerada poderá reduzir a taxa de aumento da temperatura interna.

O projeto arquitetônico exerce significativa influência sobre a ventilação natural. Muitas vezes, intuitivamente, os ocupantes de residências abrem várias janelas desejando promover a ventilação cruzada nos ambientes. Alguns deles não alcançam o seu objetivo principalmente porque esta opção não lhes foi oferecida. A determinação quanto ao tamanho e tipo de aberturas impõe limites aos fluxos de ar, e ainda pode ou não promover a ventilação durante a noite, através do uso de venezianas. O tipo de sistema construtivo pode favorecer a infiltração, levando a fluxos maiores de ar do que o necessário em algumas épocas do ano, gerando desconforto devido ao frio. A localização da edificação com relação às edificações vizinhas e aos ventos predominantes é outro fator importante a considerar no projeto arquitetônico.

O uso de programas computacionais tem contribuído em muito na busca de soluções para a área energética. Seja na escolha de um sistema de condicionamento de ar eficiente, de lâmpadas e luminárias de alto rendimento; no projeto de proteções solares; na instalação de um sistema de co-geração de energia ou até mesmo na análise das contas de energia elétrica de uma edificação.

A simulação de ventilação natural pode ser realizada através de três diferentes métodos: multizona, zonal e CFD (Dinâmica dos fluidos computacional). Cada um deles possui suas particularidades, mas apenas o método multizona fornece dados horários de fluxo de ar através de aberturas. O primeiro modelo desse tipo foi desenvolvido em 1970 (Feustel & Dieris, 1992). Dentre as variáveis necessárias para a realização de uma simulação no que tange a ventilação natural, as mais importantes podem ser divididas em três grupos: variáveis relacionadas às aberturas, às frestas das aberturas e ao ambiente externo. As portas e janelas são caracterizadas principalmente pelo tamanho das aberturas e seus respectivos coeficiente de descarga. Porém, se a janela ou porta estiver fechada, o ar que flui pelas frestas é representado através de duas variáveis: o coeficiente e o expoente de fresta. A ação do vento na edificação é representada pelos coeficientes de pressão e pelo perfil de velocidade do vento, que depende principalmente da rugosidade da superfície local.

Neste trabalho foram realizadas simulações térmicas para um modelo de residência unifamiliar situada na cidade de Florianópolis, alterando-se o tipo de envelope: transmitância das paredes e coberturas, absorvância da cobertura e área de abertura para ventilação. Além disso, foram realizadas simulações de estratégias de ventilação natural para a edificação. Para a realização das simulações foi utilizado o programa *EnergyPlus*, desenvolvido sob coordenação do DOE, Departamento de Energia dos Estados Unidos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como principal objetivo simular a ventilação natural de um modelo de residência unifamiliar utilizando-se o arquivo climático da cidade de Florianópolis, a fim de analisar o desempenho térmico da edificação frente a diferentes configurações de envoltória.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

1. Modelar e simular a ventilação natural em um protótipo habitacional unifamiliar;
2. Simular mudanças na envoltória da edificação baseadas na NBR15220 (ABNT, 2005);
3. Analisar o impacto de diferentes estratégias de aberturas de janelas no desempenho térmico da edificação;

1.2 JUSTIFICATIVAS

A cidade de Florianópolis possui 38,3% das horas do ano de desconforto devido ao calor. Para esse período a ventilação cruzada é a estratégia mais adequada. Entretanto, para esta mesma cidade, existem 40,7% de horas de desconforto por frio, para as quais a massa térmica e o aquecimento solar são as estratégias indicadas (LAMBERTS et al., 2004). Analisando-se a quase igualdade de horas de desconforto provocadas por fenômenos diferentes, torna-se claro que o projeto de edificações para esta cidade deve lidar com situações conflitantes durante a sua vida útil.

Um estudo realizado em moradias de interesse social na cidade de Florianópolis (PEREIRA, 1998) evidenciou a inadequação das moradias frente ao clima local. O desconforto térmico no ambiente construído esteve presente na maior parte das horas analisadas, principalmente no verão. Mas não é apenas em moradias de interesse social que existe a necessidade de modificações tipológicas, (LEITE & HORST, 2003) e (MASSIGNANI, 2004) constataram nos seus estudos em edifícios multi-residenciais que é necessário um aumento na área de ventilação dos apartamentos analisados. A área mínima exigida no Código de obras da cidade de Florianópolis (IPUF, 2000) é de 50% da área destinada à iluminação (1/6 área do piso), ou seja, 8% da área do piso do ambiente. Em Florianópolis, o fato da velocidade do ar diminuir durante o período noturno, justamente quando as pessoas estão retornando para suas residências, aliado a um projeto ineficiente, contribuem para um grande desconforto dos ocupantes durante os períodos quentes.

Além disso, o fluxo de calor através dos componentes estruturais, a infiltração de ar e a ventilação constituem a maior parte da carga térmica de residências. Os ganhos internos, particularmente aqueles oriundos dos ocupantes e da iluminação, são pequenos comparados com os ganhos internos em prédios comerciais e industriais (ASHRAE, 2001).

Para verificar o desempenho do sistema de ventilação, seja ele natural ou artificial, são necessárias medições das taxas de infiltração e ventilação. As medições de ventilação natural são mais complexas do que as medições de ventilação artificial e as técnicas de medição variam de acordo com os seus propósitos. Existem medições mais simples, como por exemplo, a utilização de anemômetros para medir a velocidade do fluxo de ar, até medições complexas e de custos elevados como as medições de taxas de infiltração e ventilação com o uso de gás traçador. Atualmente, na literatura brasileira, são inexistentes dados de medições de trocas de ar de ventilação natural e infiltração, provavelmente devido à complexidade e ao alto custo das medições.

Dessa forma, a simulação computacional torna-se uma ferramenta mais acessível no estudo da ventilação natural. Porém, a maioria das simulações térmicas realizadas no país é limitada. A limitação do algoritmo das ferramentas de simulação, que não calculam as trocas de ar ocorridas na edificação, ou até mesmo a falta de uma interface amigável, leva à adoção de valores de taxas constantes de ventilação e infiltração ao longo do dia e do ano ao assumir um valor estipulado pelo usuário.

A simulação computacional pode ser usada como uma ferramenta de projeto e permite uma análise rápida de diferentes alternativas. Em contrapartida, é válido lembrar que são necessários o conhecimento e controle do programa a ser utilizado, o que demanda investimento na formação de recursos humanos. Além disso, muitos fatores estão envolvidos nas simulações, e comumente faz-se uma simplificação do ambiente simulado. A quantidade de dados de entrada está intimamente ligada à morosidade das simulações e à fidelidade dos dados. Para isso, é necessário compreender a importância que cada elemento possui e as consequências que resultarão com a sua inclusão ou exclusão. Ou seja, é necessário considerar os aspectos mais importantes para a simplificação do modelo.

A partir da experiência adquirida no estudo de habitações residenciais será possível propor melhorias para esse tipo de construção. Além disso, a automatização da simulação permite a realização de milhares de estratégias combinadas. Utilizando-se disso, as simulações realizadas para cidade de Florianópolis poderão ser realizadas para climas de diferentes cidades do país.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Neste capítulo procurou-se introduzir os temas relacionados ao presente trabalho, apresentando os objetivos da pesquisa e as justificativas para a sua realização. Ao final de cada capítulo foi realizado um resumo.

O capítulo 2 compreendeu a revisão da literatura pertinente à pesquisa. Foram apresentados: os conceitos de ventilação e infiltração; os mecanismos de ventilação natural; a interação dos ocupantes com os sistemas de ventilação natural; uma breve discussão sobre as medições de trocas de ar e a apresentação de algumas técnicas de cálculo de taxas de ventilação e infiltração, que vão desde modelos simples até modelos de rede e CFD.

A metodologia de pesquisa, apresentada no capítulo 3, foi dividida em duas etapas: definição do caso base e definição das alternativas de simulação. Na modelagem do caso base, os parâmetros para a realização da simulação computacional foram definidos, tais como, geometria do modelo, envelope, cargas internas, e ainda parâmetros necessários à modelagem da ventilação natural: coeficiente de fresta (C_Q), coeficiente de descarga (C_D), dentre outros. Na segunda etapa foram definidas as alternativas de simulação, que foram baseadas nas recomendações da NBR 15220 (ABNT, 2005) para a cidade de Florianópolis.

O capítulo 4 apresentou os resultados obtidos com as simulações. Os primeiros resultados foram referentes ao caso base. Os fluxos de calor, as temperaturas internas e o número de trocas de ar horárias foram analisados para os dias de temperatura externa máxima e mínima, que ocorrem, respectivamente, nos dias 8 de janeiro e 6 de agosto do arquivo TRY. Iniciou-se a apresentação dos resultados das simulações paramétricas após a avaliação do caso base. Os parâmetros analisados foram: a orientação do modelo, a absorvância e a transmitância da cobertura e das paredes, a área de abertura destinada à ventilação, o sombreamento dessas aberturas e o tipo de ventilação. Encerrando o presente trabalho, as conclusões foram apresentadas no capítulo 5.



Capítulo 2

*R*evisão

Bibliográfica

Nos países de clima quente e úmido, a ventilação natural apresenta-se como uma boa alternativa para os períodos de desconforto por calor. A ventilação proporciona a sensação de conforto dos ocupantes de residências através do aumento da velocidade do ar interno, respeitando limites de temperatura e umidade do ar, o que conseqüentemente aumenta a taxa de evaporação do suor da pele.

Gratia et al. (2004), afirmam que em muitos casos a ventilação natural pode ser suficiente para assegurar conforto térmico em prédios ocupados, com algum esforço em reduzir a geração de calor interno através de equipamentos bem escolhidos – como é o caso de prédios de escritórios, e proteções solares. Porém, para Lamberts et al. (2004), a arquitetura residencial tem certamente o maior potencial de utilização de recursos naturais de condicionamento e iluminação.

Com relação às pesquisas relacionadas à ventilação natural, podem-se citar os estudos realizados por (TOLEDO et al. 2004) utilizando a mesa d'água, que torna possível a visualização da ventilação natural pela ação do vento através da analogia de escoamento da água; e (BITTENCOURT et al. 2003), Peixoto & Bittencourt (2003) e Wallauer & Beyer (2003) que utilizaram a simulação computacional em seus estudos. Os dois primeiros realizaram simulações com o programa PHOENICS 3.4, um programa de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e o outro utilizou o programa *EnergyPlus*. Peixoto et al. (2003), analisaram o comportamento da ventilação natural em salas de aula da Universidade Federal de Alagoas. O desempenho da ventilação natural em dois prédios distintos foi comparado. Um dos prédios foi construído sem considerar as características climáticas locais. A partir das simulações foram elaboradas propostas de intervenção nas edificações. Bittencourt et al. (2003) utilizaram o programa PHOENICS para investigar o potencial de uso de captadores de vento em uma sala de aula típica, caracterizada por um corredor central e salas em ambos os lados. Além disso, foi considerada a incidência dos ventos dominantes na região de Maceió, AL. A introdução dos captadores representou uma melhora significativa na uniformização e na intensidade do fluxo de ar nos espaços internos.

As estratégias bioclimáticas adequadas para uma determinada região a partir do estudo do clima podem ser identificadas através da carta bioclimática de Givoni (GIVONI, 1992). Os dados climáticos da localidade (umidade relativa do ar e temperatura de bulbo seco) são plotados sobre a carta psicrométrica, o que resulta em indicações de estratégias bioclimáticas a serem adotadas no projeto de edificações.

Na Tabela 1, obtida a partir de dados presentes em Lamberts et al. (2004), é possível observar que a ventilação natural apresenta-se como a estratégia mais adequada para o período de desconforto, devido ao calor, para muitas cidades brasileiras, juntamente com o uso de proteções solares, a fim de reduzir o ganho solar.

Tabela 1 – Fração das horas do ano nas quais a estratégia bioclimática mais adequada é a ventilação natural.

Cidade	% de horas
Belém	85,6
São Luís	82,0
Fortaleza	68,5
Natal	68,4
Recife	60,8
Maceió	60,4
Rio de Janeiro	57,0
Vitória	56,9
Salvador	45,5
Florianópolis	35,5
Porto Alegre	19,5
Brasília	12,6
São Paulo	10,8
Curitiba	5,1

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DE FLORIANÓPOLIS

Os programas de simulação térmica reproduzem as condições climáticas através de arquivos representativos do clima de determinada região. O *EnergyPlus*, por exemplo, necessita de um arquivo climático com registro horário de dados de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, velocidade e direção do vento, etc., para o período de um ano, ou seja, 8760 horas. O Ano Climático de Referência – TRY (Test Reference Year) – é um conjunto de dados climáticos horários, obtido através da análise de uma série de 10 anos, da qual foi extraído um ano sem extremos de temperatura (GOULART et al., 1998). Ao inserir os valores de temperatura e umidade do ar, obtidos através do arquivo TRY para a cidade de Florianópolis, na carta bioclimática de Givoni (Figura 1) é possível visualizar a concentração de pontos em cada uma das zonas de estratégias bioclimáticas.

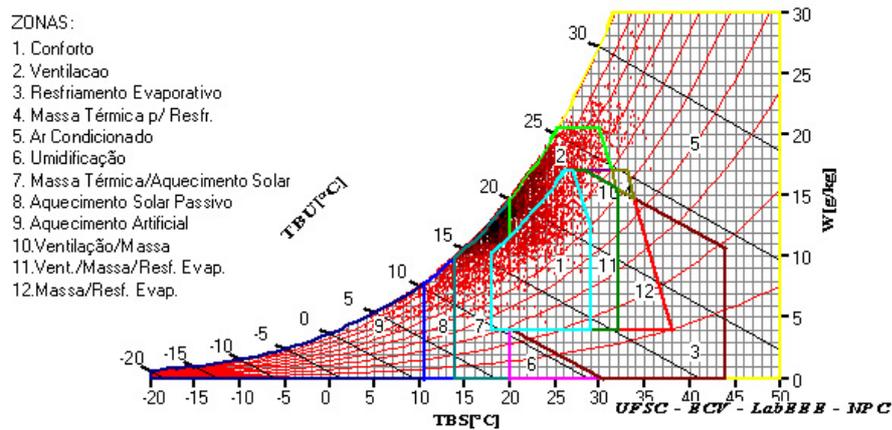


Figura 1 – Carta bioclimática para a cidade de Florianópolis.

A cidade de Florianópolis apresenta 79,1% das horas do ano em condições de desconforto térmico, sendo que 38,3% são relativas ao desconforto por calor e 40,7% das horas relacionadas ao desconforto por frio. Com relação às horas de desconforto por calor, em 93% destas, a estratégia bioclimática indicada é a ventilação, porém em 35,4% das horas de desconforto por frio, ou seja, 87%, a estratégia indicada é de massa térmica e aquecimento solar. A dualidade das estratégias mais adequadas para as horas de desconforto do clima de Florianópolis exige que a envoltória da edificação possibilite a adequação da residência aos períodos de frio e de calor, possibilitando o máximo conforto possível aos ocupantes.

O principal agente responsável pela ventilação natural é a diferença de pressão causada pelo vento. A predominância dos ventos nos quadrantes norte e nordeste é uma característica do clima de Florianópolis (Figura 2). Para o período de verão a frequência de ocorrência na direção nordeste é maior do que 20%, com velocidade predominante de 6m/s (Figura 3). No período de inverno o vento do norte é predominante em aproximadamente 35% das horas do período, sendo que a velocidade predominante é de 3m/s.

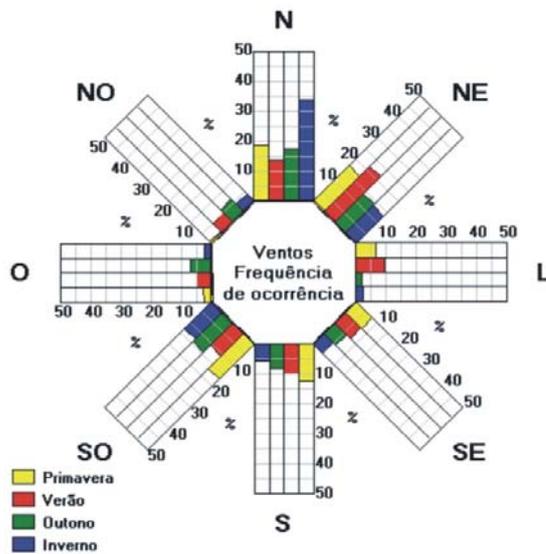


Figura 2 - Frequência de ocorrência dos ventos para a cidade de Florianópolis no arquivo TRY. (Fonte: LabEEE, 2005)

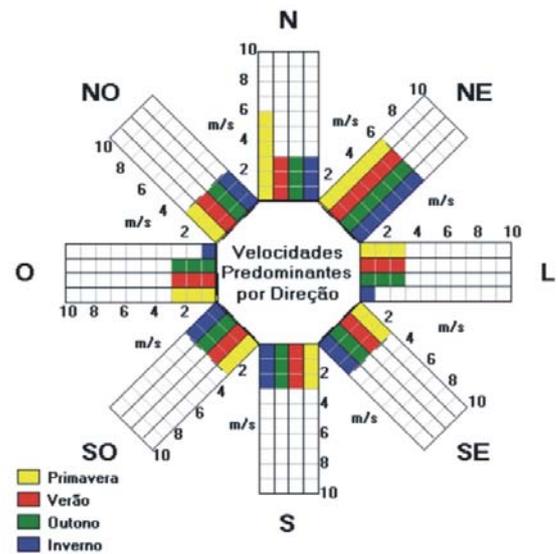


Figura 3 – Velocidades predominantes do vento por direção para a cidade de Florianópolis no arquivo TRY. (Fonte: LabEEE, 2005)

A partir do ano climático de referência é possível conhecer o comportamento das temperaturas de um determinado local ao longo do ano. A cidade de Florianópolis apresenta maiores frequências de ocorrência de temperaturas de bulbo seco entre 18°C e 24°C, como pode ser observado na Figura 4.

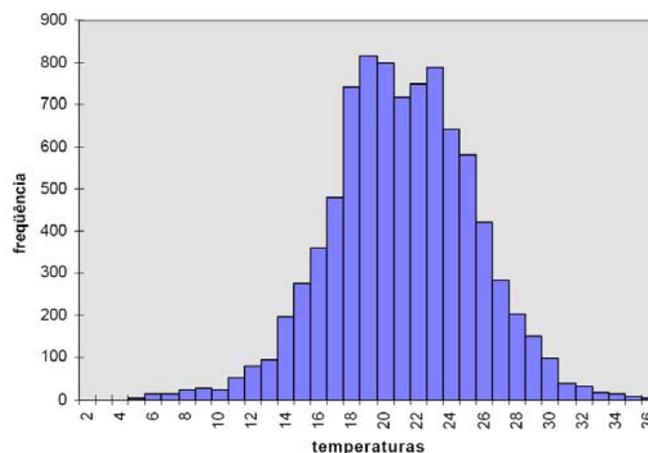


Figura 4 – Frequência de ocorrência das temperaturas de bulbo seco do TRY (Fonte: GOULART et al., 1998).

A Tabela 2 apresenta os valores de temperaturas de bulbo seco (TBS) média das máximas e média das mínimas anual e mensal. A temperatura média das máximas anual é de 24,8°C e a média das mínimas é de 17,0°C. O maior valor de temperatura média das máximas ocorre no mês de fevereiro, 29,0°C, e a menor média das mínimas ocorre em julho, 13,0°C.

Tabela 2 – Temperaturas Média das máximas e Média das mínimas (°C). Fonte: Goulart et al. (1998).

Média	Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TBSmáx	24,8	28,8	29,0	28,0	25,7	23,8	21,7	21,1	21,5	22,0	23,8	25,6	27,3
TBSmin	17,0	20,8	21,1	20,2	17,8	14,9	13,5	13,0	13,9	15,1	16,7	18,2	19,6

2.2 INTERAÇÃO DOS OCUPANTES COM OS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

A ventilação natural promove o controle da qualidade do ar e o conforto térmico dos ocupantes. O controle da qualidade do ar é realizado através do fornecimento de ar fresco e diluição dos poluentes. Para Givoni (1994), existem duas maneiras de promover o conforto através da ventilação. Uma é através do efeito direto fisiológico: ao abrir as janelas a pessoa no interior de uma edificação sente-se refrescada, pois as altas velocidades do ar aumentam a taxa de evaporação na superfície da pele, e conseqüentemente reforçam a sensação de resfriamento. A outra maneira é indireta, através da ventilação noturna. Ao ventilar a edificação apenas à noite, promove-se uma refrigeração da massa interna da edificação que durante o dia seguinte reduz a taxa de aumento da temperatura interna. Entretanto, Allard (1998) chama a atenção para o fato de que a ventilação natural pode deslocar a zona de conforto térmico para regiões de altas temperaturas do ar. O limite de velocidade do ar, geralmente recomendado, é de 0,8m/s (ASHRAE, 2001) para que os ocupantes estejam em boas condições de conforto térmico a altas temperaturas.

O fluxo de ar é o principal meio de proporcionar o conforto térmico dos ocupantes de regiões de alta umidade. Dessa forma, apesar da velocidade do ar interno em edificações com ventilação cruzada ser geralmente em torno de 1 a 2m/s, Givoni (1994) afirma que pessoas que vivem em edificações naturalmente ventiladas geralmente aceitam um intervalo maior de temperatura e velocidade do vento. Geralmente, o limite de velocidade de ar de 2m/s é imposto para conforto térmico para prevenir incômodos oriundos das altas velocidades de ar, por exemplo, papéis voando, portas batendo, etc (AYNSLEY, 1999).

Em um estudo realizado na cidade de Atenas sobre ventilação natural e mecânica em edificações residenciais, Niachou et al. (2005) constataram que as pessoas sentem-se incomodadas pelo vento gerado por um ventilador. Elas sentem-se melhores quando expostas à ventilação natural. Porém, Matos et al. (2005) lembra que há uma dificuldade na construção de um modelo ao assumir um padrão de uso para a ventilação. Pois a forma de ventilação de uma edificação está intimamente ligada à cultura e à rotina das pessoas. Para um determinado padrão de uso, uma área de janela pode atender às condições de conforto do usuário e para outro não.

Segundo Aynsley (1999) existem inúmeros modelos para estimar o efeito de resfriamento causado pelo fluxo de ar, mas uma simples aproximação sugere um efeito de resfriamento de 3,7K para cada metro por segundo de fluxo de ar. Ainda de acordo com Aynsley (1999), no que diz respeito ao conforto térmico em edifícios naturalmente ventilados, existe a necessidade de desenvolvimento de métodos computacionais mais simples para o estágio preliminar de projeto e para o uso em edificações menores e de custos mais baixos, como casas.

Os ocupantes das residências são os responsáveis pela abertura e fechamento das janelas e portas. O simples fato de abrir ou não uma janela pode estar associado a valores de ordem cultural, social e natural. Em Concannon (2002) ocupantes de diversos países expuseram as razões para a ventilação ou não das suas casas. Dentre as razões para ventilar a casa estão:

- a) Captar ar fresco em quartos e salas de estar;
- b) Remover odores;
- c) Remover o ar antigo e a condensação;
- d) Arejar a casa durante as atividades domésticas;
- e) Remover a fumaça de cigarro. Em casas de fumantes a abertura de janelas é duas vezes mais freqüente do que em casas de pessoas não fumantes.

As razões para não ventilar a casa incluem:

- a) Prevenção de correntes de ar localizadas (*draughts*);
- b) Manter uma temperatura preferencial;
- c) Proteção do frio e da chuva;
- d) Manter privacidade e segurança;
- e) Reduzir o barulho e a poluição externos.

Uma das dificuldades encontradas em simulações é com relação ao comportamento dos ocupantes. É preciso estimar o tempo de uso dos equipamentos, ocupação dos ambientes, tempo de uso de iluminação e ainda estimar o padrão de uso das aberturas. Algum esforço em simular o comportamento dos usuários vem sendo desenvolvido. A estimativa e a habilidade de aprendizado necessitam do uso de inteligência artificial baseada no comportamento dos ocupantes. Para isso são necessários sistemas especializados, algoritmos desenvolvidos, rede neural artificial e raciocínio *case-based* (WYCKMANS et al., 2005).

2.3 MECANISMOS DE VENTILAÇÃO NATURAL

A troca entre o ar externo e o ar do interior de um edifício pode ser dividida em duas grandes classificações: ventilação e infiltração.

De acordo com ASHRAE (2001), ventilação é a introdução intencional de ar do exterior para o interior do edifício; é ainda dividida em ventilação natural e ventilação forçada. Ventilação natural é o fluxo de ar intencional através de janelas abertas, portas, grades, e outras penetrações através do envelope da edificação, e é dirigida pelos diferenciais de pressão produzidos naturalmente. Ventilação forçada é o movimento intencional de ar para dentro e para fora do edifício usando ventiladores, insufladores e exaustores; é também chamada de ventilação mecânica.

Infiltração é o fluxo incontrolado do ar externo para dentro do edifício através de frestas e outras aberturas intencionais e através do uso normal das portas externas para entrada e saída de pessoas (ASHRAE, 2001).

A ventilação natural pode ocorrer devido à diferença de pressão causada pelo vento e por diferenças de temperatura.

2.3.1 DIFERENÇA DE PRESSÃO CAUSADA PELO VENTO

O vento, ao passar pela edificação, cria uma distribuição de pressão ao seu redor, como apresentado na Figura 5.

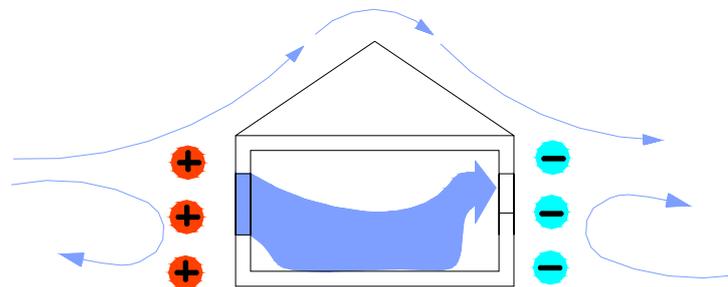


Figura 5 - Diferença de pressão causada pelo vento

A pressão devido à ação do vento é determinada através da Equação 1:

$$P_w = C_p \times P_{din(z)} \quad (1)$$

onde: P_w é a pressão causada pelo vento (Pa);

C_p é o coeficiente de pressão;

P_{din} é a pressão dinâmica do vento na altura Z de referência (Pa).

A pressão dinâmica em determinada altura pode ser calculada através da Equação 2:

$$P_{din(z)} = 0,5 \cdot \rho \cdot v_{(z)}^2 \quad (2)$$

onde: ρ é a densidade do ar externo em função da pressão atmosférica, temperatura e umidade (kg/m^3);

v é a velocidade do vento (m/s) em uma determinada altura z (m).

Os valores de velocidade do vento utilizados nas simulações são dados relativos a uma altura de referência, 10 metros geralmente, onde os valores foram medidos (estação metereológica). Baseada nesta altura de referência a velocidade do vento na altura desejada é determinada. As equações de correção da velocidade do vento variam de acordo com o método adotado. As equações podem ser funções exponenciais (Equação 3) ou funções logarítmicas (Equação 4).

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (3)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (4)$$

A Equação 5 é utilizada no programa *EnergyPlus* (DOE, 2006).

$$V_{ref} = V_{met} \times \left[\frac{\delta_{met}}{h_{met}} \right]^{\alpha_{met}} \times \left[\frac{h_{ref}}{\delta_{ref}} \right]^{\alpha_{ref}} \quad (5)$$

onde: V_{ref} é a velocidade do vento na altura desejada (m/s);

V_{met} é a velocidade do vento obtida a partir do arquivo climático (m/s);

δ_{met} é a camada limite do local de instalação da estação metereológica (m);

δ_{ref} é a camada limite do terreno considerado na simulação (m);

h_{met} é a altura de instalação da estação metereológica (m);

h_{ref} é a altura de referência utilizada nos dados de Coeficiente de pressão (m).

α_{met} é o expoente do local de instalação da estação metereológica (m);

α_{ref} é o expoente do terreno considerado na simulação (m);

A Tabela 3 recomenda valores de expoente e valores de camada limite de acordo com a categoria do terreno.

Tabela 3 – Valores de expoente e camada limite para diferentes categorias de terreno. Fonte: ASHRAE (2001).

Categoria do terreno	Descrição	Expoente (α)	Camada Limite (δ)
1	Grandes centros urbanos nos quais pelo menos 50% das edificações são maiores do que 21m	0,33	460
2	Terreno urbano, subúrbio, áreas com árvores, áreas com espaçamento entre obstruções do tamanho ou maiores do que casas unifamiliares	0,22	370
3	Terreno aberto com poucas obstruções, geralmente menores do que 10m de altura.	0,14	270
4	Áreas desobstruídas próximas a grandes corpos de água, não mais do que 500m terra adentro.	0,10	210

A Tabela 4 expõe valores de expoente e valores de camada limite de acordo com a categoria do terreno segundo estudo realizado por Wolfenseher (1978).

Tabela 4 - Valores de expoente e camada limite para diferentes categorias de terreno. Fonte: AIVC (2005).

Classe	Descrição do terreno	Expoente (α)	Camada Limite (δ)
1	Centro de cidades	0,35 - 0,45	480 – 550
2	Bosques, pequenas cidades, subúrbios	0,25 - 0,35	400 – 480
3	Terreno aberto com obstáculos isolados	0,15 - 0,25	320 – 400
4	Mar, terreno com poucos obstáculos	0,1 - 0,15	240 – 320

O expoente α e a camada limite aumentam com a rugosidade do terreno. No programa *EnergyPlus* (DOE, 2006), o expoente da função que define o perfil de velocidade do vento pode assumir os seguintes valores: 0,10 para um nível de superfícies com pequenas obstruções; 0,22

para um gramado com numerosas obstruções, como árvores e pequenas casas; e 0,32 para superfícies heterogêneas com estruturas maiores do que 1 pavimento.

Em Feustel & Smith (1997) consta que a validade das equações de perfil de vento para áreas urbanas é normalmente pequena, a menos que o edifício seja maior que as edificações vizinhas. No caso de edificações baixas em terrenos rugosos e com grandes obstáculos, dados do Coeficiente de pressão medidos através de túneis de vento ou medições *in loco* podem ser utilizados. Porém, essa última opção é praticamente inviável devido ao seu alto custo.

O Coeficiente de pressão (C_p) é um parâmetro que caracteriza o padrão do fluxo de ar ao redor da edificação. Ele representa as mudanças na pressão induzida pelo vento, causadas pela influência das obstruções do entorno nas características prevalentes do vento local (ALLARD, 1998). Ou seja, o valor do C_p muda de acordo com a topografia e rugosidade do terreno. Comumente assume-se que o C_p independe da velocidade do vento, mas varia de acordo com a direção do vento e posição da superfície da edificação (LIDDAMENT, 1986). Normalmente, obtêm-se os valores de C_p para as simulações computacionais a partir de algoritmos baseados em medições, realizados principalmente em túneis de vento. O Coeficiente de pressão é definido em Liddament (1986) como um parâmetro empírico e adimensional, que relaciona a pressão dinâmica na superfície externa da edificação com a pressão dinâmica devido à velocidade do vento no ponto de referência, de acordo com a Equação 6.

$$C_p = \frac{P - P_{0(z)}}{P_{din(z)}} \quad (6)$$

onde:

P é a pressão medida (Pa);

P_0 é a pressão estática para o vento livre na altura Z de referência (Pa);

P_{din} é a pressão dinâmica na altura Z de referência (Pa).

De acordo com AIVC (2005), para edificações baixas de até três pavimentos com geometria simples e densidade de entorno uniforme, os valores médios de C_p ajustam-se com precisão suficiente aos requerimentos dos modelos de cálculo de fluxo de ar.

A Equação 7, presente em ASHRAE (2001), foi desenvolvida por Swami & Chandra (1988) a partir de uma base de dados contendo 544 valores médios de coeficientes de pressão. A partir de investigações em oito prédios baixos e em um prédio alto, foi desenvolvida a relação

entre o ângulo do vento incidente, a razão dos lados da edificação e o valor médio do coeficiente de pressão das superfícies.

$$C_{p,n} = \ln \left[\begin{array}{l} 1,248 - 0,703 \sin(a/2) - 1,175 \sin^2(a) \\ + 0,131 \sin^3(2aG) + 0,769 \cos(a/2) \\ + 0,07G^2 \sin^2(a/2) + 0,717 \cos^2(a/2) \end{array} \right] \quad (7)$$

onde: a é o ângulo entre a direção do vento e a normal da parede considerada em graus

G é o logaritmo natural da razão entre a largura da parede considerada e a largura da parede adjacente.

A fim de obter uma análise mais detalhada, levando em consideração a distribuição dos coeficientes de pressão no envelope da edificação, Grosso et al. (1995) desenvolveram um modelo numérico baseado em análises paramétricas de testes em túneis de vento. O CPCALC+ calcula os valores de C_p para qualquer posição de um elemento da superfície do envelope de uma edificação de formato retangular para dadas condições de rugosidade do terreno, densidade das edificações do entorno, razões entre as dimensões e direção do vento.

Um programa similar, baseado em ajustes de dados medidos, está sendo desenvolvido pelo TNO Built Environment and Geosciences. O Cp Generator (TNO, 2005) é um aplicativo *on line* acessível apenas para usuários registrados. O arquivo de entrada é em formato de texto, e deve possuir as coordenadas e orientações da edificação e dos obstáculos, bem como as coordenadas das posições do C_p na edificação. O cálculo é realizado para modelos retangulares (blocos), mas é possível enviar um modelo específico, com outro formato, para os desenvolvedores do programa.

Georgakis & Santamouris (2005) realizaram medições de velocidade e direção do vento em cinco *canyons* urbanos em Atenas durante três dias, por um período de 12h diárias. As medições foram realizadas no meio dos *canyons* e a seis metros acima do topo e também a uma distância de três metros das fachadas dos edifícios. Como resultado do estudo foi criado um modelo semi-empírico para o cálculo da velocidade do vento em *canyons* urbanos. Para ser um *canyon* urbano a relação entre a altura dos edifícios e largura do espaço entre eles deve ser maior do que 0,7. A Figura 6 apresenta o fluxograma do algoritmo.

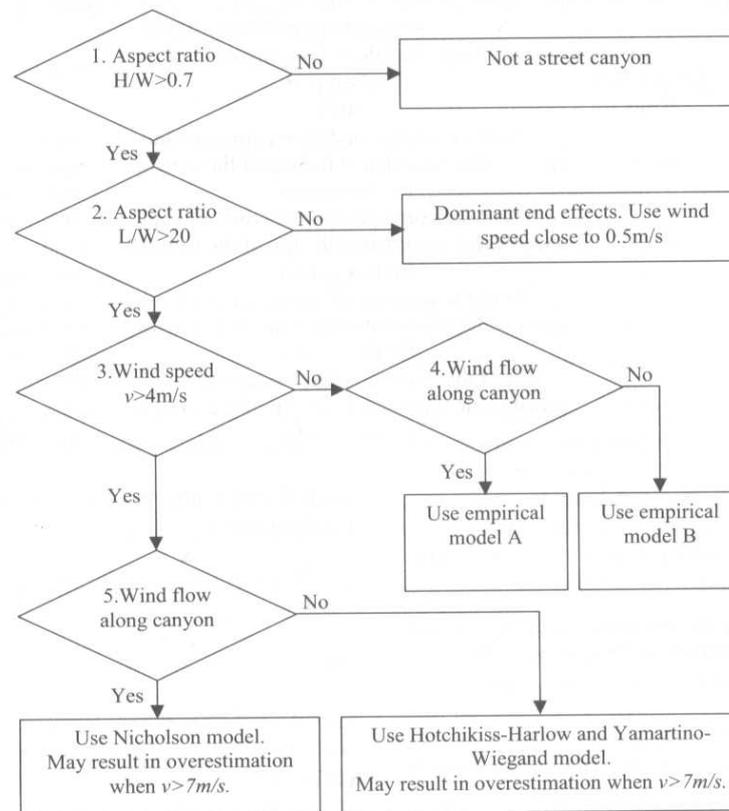


Figura 6 - Fluxograma do algoritmo para o cálculo da velocidade do vento em *canyons* urbanos.
Fonte: Georgakis & Santamouris (2005).

O modelo empírico A considera a velocidade na parte mais alta do *canyon* como sendo 75% da velocidade máxima registrada no topo do *canyon* e 0m/s na parte mais baixa. O modelo B também considera esses valores para a fachada de incidência do vento, porém para a fachada oposta o valor considerado é de 50% do valor calculado para a velocidade do vento na fachada de incidência. Esses modelos são utilizados para velocidades do vento fora do *canyon* menores do que 4m/s. Para velocidades do vento acima de 4m/s têm-se o modelo de Nicholson e o modelo Hotchikiss-Harlow e Yamartino-Wiegand. O primeiro é para quando o vento flui ao longo do *canyon* e o segundo para quando isso não ocorre.

2.3.2 DIFERENÇA DE PRESSÃO CAUSADA POR DIFERENÇA DE TEMPERATURA

O outro fenômeno físico que influencia as taxas de infiltração e ventilação de uma edificação é o efeito chaminé, também chamado termo-sifão. Este fenômeno ocorre devido às diferenças de densidade do ar interno e externo de uma edificação ou entre zonas (ALLARD, 1998). A Figura 7 ilustra o fenômeno. O efeito chaminé pode ser calculado integrando a equação de Bernoulli, assumindo a ausência de vento. A pressão gerada por esse fenômeno é dada pela Equação 8.

$$(p_{ext} - p_{in})_{stack} = g(\rho_{in} - \rho_{ext})(z - npl) \quad (8)$$

onde: $(p_{ext} - p_{in})_{stack}$ é a diferença de pressão devido ao efeito chaminé (Pa);

g é a constante de gravidade (m^2/s);

$(\rho_{in} - \rho_{ext})$ é diferença de densidade entre o ar interno e externo (kg/m^3);

$(z - npl)$ é a distância entre a altura z e a linha neutra de pressão (m).

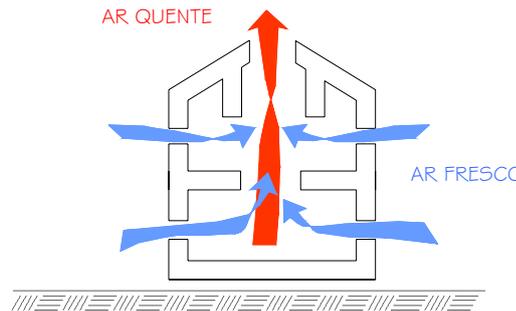


Figura 7 - Diferença de pressão causada por diferença de temperatura.

2.3.3 FLUXO DE AR ATRAVÉS DE ABERTURAS

O fluxo de ar através de uma abertura pode ser calculado através da Equação 9.

$$Q = C_D \cdot A \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad (9)$$

onde: C_D é o coeficiente de descarga;

A é a área da abertura (m^2);

Δp é a diferença de pressão ao longo da abertura (Pa);

ρ é a densidade do ar (kg/m^3).

O coeficiente de descarga (C_d) é uma função da diferença de temperatura, da velocidade do vento e, principalmente, da geometria da abertura. Para aberturas pequenas internas, um valor representativo é 0,65, para grandes aberturas internas, o valor pode ser próximo a 1,0, e um valor médio para uma abertura padrão é 0,78 (ALLARD, 1998). No caso de coeficientes de descarga para janelas e portas, é geralmente utilizado um valor de 0,6 para uma abertura retangular (AYNSLEY, 1999).

Kosmos et al. (1993) consideram que o transporte de ar através de uma tela pode ser suficientemente descrito pela equação de Bernoulli e as características do fluxo de ar podem ser definidas de acordo com um coeficiente de descarga. Em seu estudo o coeficiente de descarga

obtido variou entre 0,07 e 0,48 dependendo do tamanho da malha da tela. O mesmo método poderia ser utilizado para uma veneziana visto que também se constitui como um impedimento de passagem para o fluxo de ar. Na literatura existem inúmeros estudos contendo métodos para estimar valores de coeficientes de descarga para janelas e portas, mas nenhuma metodologia tem sido desenvolvida para calcular coeficientes de descarga para grandes aberturas equipadas com dispositivos de proteção solar (TSANGRASSOULIS et al., 1996).

2.3.4 FLUXO DE AR ATRAVÉS DE FRESTAS

O fluxo de ar através de uma fresta pode ser representado por uma equação exponencial (Equação 10), que fornece o fluxo de ar em função da diferença de pressão.

$$Q = C_Q (\Delta P)^n \quad (10)$$

onde: Q é o fluxo da massa de ar (kg/s);

C_Q é o coeficiente do fluxo de massa de ar (kg/s.Paⁿ);

ΔP é a diferença de pressão através da fresta (Pa);

n é o expoente do fluxo de ar.

O coeficiente C_Q é uma função da geometria da abertura. Em Clarke (1985) é fornecida uma equação empírica para o cálculo do coeficiente C_Q (Equação 11), onde L_{cr} é o comprimento da fresta.

$$C_Q = L_{CR} \times 9,7 \times (0,0092)^n \quad (11)$$

O expoente “ n ” depende das características do fluxo de ar e varia entre 0,5 e 1. Segundo Allard (1998), um valor de 0,5 corresponde a um fluxo muito turbulento e um valor de 1 corresponde a um fluxo laminar. Pode ser adotado um valor de 0,67 para frestas formadas ao redor de janelas fechadas. Em ASHRAE (2001) consta que frestas com grande resistência ao fluxo de ar (por exemplo, largura estreita ou com grande comprimento), tendem a ter um expoente próximo a 1. Para aberturas nas fachadas dos edifícios, o valor de “ n ” depende da geometria da abertura, bem como dos efeitos de entrada e saída.

A Equação 12, também apresentada em Clarke (1985), descreve o valor n , onde W é a largura da fresta em mm (distância perpendicular à parede).

$$n = 0,5 + 0,5 \cdot e^{(-0,5W)} \quad (12)$$

As frestas podem ser classificadas de duas maneiras: de acordo com o tipo de componente construtivo ou de acordo com o comportamento físico. Feustel (1998) afirma que a última classificação não é praticável em cálculos de infiltração para edificações reais, pois os tipos de frestas em uma edificação específica são normalmente desconhecidos. Em Liddament (1986) é possível encontrar valores de C_Q e do expoente n para diversos tipos de frestas. Na Tabela 5 foram reproduzidos os valores de C_Q ($\text{dm}^3/\text{s.m}$) e n para as frestas formadas na junção das esquadrias das aberturas com a parede, frestas em portas de madeira e metal e, por fim, frestas em janelas de correr.

Tabela 5 – Valores de n e C_Q para diferentes tipos de frestas. Fonte: Liddament (1986).

Tipo de fresta			Valores de n			Valores de C_Q		
			Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Junção de parede com esquadrias de portas e janelas	abertura de madeira	Parede de tijolo		0,6			0,0014	
		Parede de madeira		0,66		0,05	0,05	0,06
Porta de madeira pivotante	Selada	Interna	0,5	0,6	0,7	0,81	1,45	2,57
		Externa		0,64		0,7	0,96	1,24
	Não selada	Interna	0,51	0,59	0,79	0,49	1,58	3,38
		Externa	0,5	0,59	0,71	0,79	1,32	3,52
Porta de metal pivotante		Interna		0,66			0,038	
		Externa		0,66			0,038	
Janela com deslizamento horizontal	1 folha de madeira	Selada		0,66			0,05	
		Não selada		0,66			0,13	
	1 folha de metal	Selada		0,66		0,05	0,08	0,18
		Não selada		0,66			0,13	
	2 folhas de madeira	Selada		0,66			0,06	
		Não selada		0,66		0,08	0,19	0,31
	2 folhas de metal	Selada		0,66		0,04	0,08	0,13
		Não selada	0,55	0,63	0,67	0,12	0,22	0,43
	2 folhas de plástico	Selada		0,66			0,08	

2.4 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TAXAS DE VENTILAÇÃO E INFILTRAÇÃO

As medições das taxas de infiltração e ventilação são necessárias para verificar o desempenho dos sistemas de ventilação, sejam eles naturais ou artificiais. Os dados obtidos com as medições são fundamentais para entender os mecanismos da ventilação e o fluxo de ar nas edificações. Além disso, esses dados podem ser utilizados para a calibração de modelos nos estudos paramétricos da edificação. Para Pedrini (1997) o domínio de técnicas de calibração de modelos é indispensável para proceder simulações de comportamentos térmico e energético confiáveis e promover a implantação de medidas de conservação de energia.

As técnicas de medição de ventilação natural são mais complexas do que os procedimentos utilizados na ventilação artificial. Os métodos variam de acordo com os seus propósitos. Existem medições mais simples, como por exemplo, a utilização de anemômetros para mensurar a velocidade do fluxo de ar, até técnicas complexas e caras, como o uso de gás traçador para estimar as de taxas de infiltração e ventilação. Existem ainda as medições de pressão para determinar a permeabilidade da edificação ou de seus componentes; a quantificação da diferença de pressão através de aberturas; os túneis de vento para avaliar a distribuição da pressão ao redor da edificação; e o uso de mesas d'água que auxiliam na visualização dos padrões do fluxo de ar.

Segundo ASHRAE (2001), as taxas de troca de ar de uma edificação existente só podem ser medidas de uma maneira confiável através da injeção de um gás traçador no edifício e conseqüente monitoramento e análise da concentração do gás. Porém, a confiabilidade desse processo ainda depende de alguns fatores inerentes ao método. Todas as técnicas de medição com gás traçador são baseadas no equilíbrio de massa do gás com a edificação. Assume-se que a concentração do gás no exterior é zero e que o ar interno é bem misturado o que resulta na Equação 13.

$$V \left(\frac{dC}{dt} \right) = F(t) - Q(t) \cdot C(t) \quad (13)$$

onde: V é o volume do ambiente (m^3);

$\left(\frac{dC}{dT} \right)$ é a taxa da mudança de concentração (s^{-1});

$F(t)$ é a taxa de injeção de gás no instante t (m^3/s);

$Q(t)$ é o fluxo de ar que deixa a edificação no instante t (m^3/s);

$C(t)$ é a concentração de gás no instante t ;

Três procedimentos de medição com gás traçador, utilizados para determinar as taxas de trocas de ar, são descritos em ASHRAE (2001):

- a) Método da concentração decrescente ou crescente;
- b) Método da concentração constante;
- c) Método da emissão constante.

O método da concentração decrescente ou crescente é o método mais simples para obter as taxas de troca de ar num ambiente. É utilizado para medições em um curto período de tempo. Uma vantagem do método é que a taxa de emissão não precisa ser medida, porém deve ser controlada para que a concentração esteja no intervalo de medição do equipamento utilizado. O maior problema desta técnica é a má mistura do gás traçador com o ar interno.

O método da concentração constante é utilizado em longo prazo, em medições contínuas de taxas de troca de ar de uma única zona, ou em medições de fluxo de ar através de dutos de ventilação.

No método da emissão constante, a taxa de emissão de gás é ajustada para se manter constante, por isso não é necessário um período inicial para a mistura entre o gás e o ar interno. É o método utilizado em medições contínuas de taxas de troca de ar de uma ou mais zonas. É particularmente útil para conduzir análises em prédios ocupados. Outra vantagem é que a emissão do gás em cada zona da edificação pode ser controlada separadamente, por isso o fluxo de ar externo em cada zona pode ser determinado. Tem a desvantagem de requerer a medição absoluta das taxas de emissão e concentração do gás traçador.

Os gases comumente utilizados nas medições são o SF_6 (Hexafluoreto de enxofre), o NO_2 (Óxido nítrico) e o CO_2 (Dióxido de carbono). O dióxido de carbono é um gás ligeiramente

tóxico, inodoro e incolor. Os gases SF₆ e o NO₂ são gases de elevado custo e contribuem para o efeito estufa. Um bom gás traçador deve ser incolor, inodoro, inerte e não estar presente no ambiente em grandes concentrações.

Koene & Bakker (2005) realizaram medições de ventilação natural utilizando CO₂ como gás traçador. As medições foram realizadas em 4 salas, que possuem aquecimento elétrico, permitindo um controle mais preciso das temperaturas internas e do monitoramento do consumo de energia. Foram realizadas medições a cada 10 minutos das temperaturas do ar, paredes, piso e teto; do consumo de energia; velocidade do vento, temperatura externa e radiação solar. Um computador simulava a ocupação das salas controlando a temperatura interna de *setpoint* e a injeção de CO₂. O CO₂ era injetado no meio da sala a uma altura de aproximadamente 2 metros. Entre 6h e 23h a temperatura interna era mantida em 25°C e as janelas permaneciam fechadas. Às 23h o aquecimento era desligado e as janelas eram abertas até às 6h, quando novamente a sala era aquecida. O CO₂ era injetado, durante a noite, no ambiente utilizando um controlador de fluxo e válvulas de controle. A injeção do gás não era contínua, pois a válvula de cada sala era aberta durante 100 segundos a cada 10 minutos. A taxa média de injeção era de 0,015m³/h. A velocidade média do gás no ponto de injeção era de aproximadamente 0,3m/s. A concentração de CO₂ no ambiente era monitorada durante os períodos sem injeção de CO₂. Os números de trocas de ar por hora (*n*) eram obtidos através da taxa de injeção e da diferença entre a concentração do CO₂ no nó de saída e no ambiente, de acordo com a Equação 14.

$$(C_{EXH} - C_{AMB}) \cdot V \cdot n = \Phi_{INJ} \quad (14)$$

onde:

C_{EXH} é a concentração de CO₂ no nó de saída;

C_{AMB} é a concentração de CO₂ no ambiente;

V é o volume do ambiente;

n é o números de trocas de ar por hora;

ϕ_{INJ} é a taxa de injeção.

Um estudo feito em Hong Kong, por Chao et al. (2004), apresenta dados de medições de taxa de troca de ar em um apartamento doméstico de um prédio de pequeno porte, situado em uma área rural. Não havia obstruções nas janelas. Foi constatado que quando todas as janelas estavam abertas, a taxa de troca de ar no ambiente média medida foi de 1,24 troca de ar por hora usando a estratégia de concentração constante de gás traçador e 1,44 troca de ar por hora utilizando o método em que a concentração diminui com o tempo (*decay*). Com as janelas fechadas, a taxa de troca de ar no ambiente média medida foi de 0,44 troca de ar por hora usando o método de concentração constante de gás traçador e 0,51 troca de ar por hora utilizando-se o outro método. Considerando que este prédio situa-se numa área rural, parece baixo o número de trocas de ar. Porém, a taxa de infiltração de uma construção depende das condições do clima, operação do equipamento de medição, atividade dos ocupantes e geometria das aberturas. Portanto, como o autor não especificou o período de medições, a influência dos ocupantes e a permeabilidade das aberturas, não foi possível realizar uma análise mais concreta acerca dos valores obtidos nas medições.

Segundo ASHRAE (2001), valores típicos de infiltração em casas na América do Norte variam de 0,20 troca de ar por hora para casas bem seladas a valores maiores do que 2,0 trocas para casas não tão seladas. Um estudo realizado em casas relativamente novas e energeticamente eficientes, em diferentes áreas da América do Norte, obteve uma média de 0,50 troca de ar por hora. Um outro estudo realizado em casas velhas, de baixa renda, em 16 cidades dos EUA obteve uma média de 0,90 troca. Nesses estudos a influência dos ocupantes não foi medida diretamente e essa influência varia extensamente. Ainda segundo ASHRAE (2001), os ocupantes adicionam uma média de 0,10 troca a 0,15 troca de ar por hora a valores de espaços não ocupados. Por isso, fica difícil estabelecer um parâmetro de comparação entre os resultados obtidos em simulações e os encontrados na literatura. Ou seja, para uma correta modelagem das frestas e aberturas, é necessária a realização de medições que representem a realidade das construções no país.

Para Santamouris & Asimakopoulous (1996), novas edificações permitem taxas de infiltração horárias que variam entre 0,20 e 0,50, enquanto que, no verão, quando as janelas estão abertas, é possível alcançar valores entre 15 e 20 trocas de ar por hora. Ressaltam ainda que valores altos de trocas de ar, em torno de 30, podem ocorrer através de métodos naturais, mas que isso implica em uma necessidade de um grande número de janelas e no cuidado com os posicionamentos dessas aberturas no ambiente. Porém, a única maneira de aumentar a taxa de ventilação em uma edificação não se deve apenas ao aumento do tamanho das aberturas. O uso de *wing walls* (espécie de recuo em paredes), por exemplo, pode representar um aumento na

velocidade do ar interno. Givoni (1994) apresenta dados de uma pesquisa realizada em 1976 na qual constatou um aumento da velocidade do ar interno com relação à velocidade do vento em edificações com ventilação unilateral com o uso de *wing walls*. Para uma mesma direção de vento a velocidade do ar aumentou de 3,3% da velocidade externa para 36,2% da velocidade externa.

2.5 TÉCNICAS DE CÁLCULO DE TAXAS DE VENTILAÇÃO E INFILTRAÇÃO

Existem diferentes técnicas para estimar as taxas de ventilação e infiltração através de uma abertura. Liddament (1986) divide as técnicas de cálculo de infiltração e ventilação em métodos empíricos e métodos teóricos. Os métodos empíricos são: a) Método das trocas de ar, b) Teste de redução de pressurização; e c) Técnicas de regressão. A técnica de redução da pressurização obviamente necessita dos dados das medições de pressurização da edificação ou pelo menos da estimativa desses valores. O método de regressão pode ser utilizado desde que possam ser realizadas medições de taxas de infiltração na edificação. Os métodos teóricos são os métodos de redes e os métodos simplificados. Para Santamouris (1998) a divisão dos métodos é baseada no grau de complexibilidade da modelagem. Dessa forma, existem quatro diferentes modelos: modelos empíricos, modelos de redes, modelos zonais e modelos CFD. Essa classificação foi adotada para descrever os métodos a seguir.

2.5.1 MÉTODOS EMPÍRICOS

Os modelos empíricos consideram apenas a infiltração através do envelope e não lidam com a ventilação intencional (ASHRAE, 2001). Esses métodos são adequados a geometrias simples, que possuam ventilação unilateral, ou para uma zona que possua duas aberturas.

2.5.1.1 Método das trocas de ar

O método descrito em ASHRAE (2001) assume que as aberturas de entrada e saída de ar são equivalentes em tamanho. Através da Equação 15 pode-se determinar o tamanho apropriado das aberturas para produzir uma determinada taxa de fluxo de ar ou calcular a taxa de ar induzido pelo vento através de aberturas de ventilação.

$$Q = C_v \cdot A \cdot V \quad (15)$$

onde: Q é a taxa de fluxo de ar (m^3/s);
 C_v é o coeficiente de eficiência das aberturas;
 A é área livre das aberturas de entrada de ar (m^2);
 V é a velocidade do vento (m/s).

O coeficiente de eficiência de abertura, C_v , é assumido como sendo 0,50 a 0,60 para direções de ventos perpendiculares e 0,25 a 0,35 para direções de vento diagonais à superfície. As aberturas de entrada de ar devem estar voltadas para a direção de vento predominante, caso contrário, as taxas de fluxo de ar estarão superestimadas.

2.5.1.2 Dados de teste de redução de pressurização

Essa técnica de cálculo é muito simples, pois é possível estimar o desempenho médio da edificação com relação à infiltração a partir dos dados obtidos em testes de pressurização. O teste de pressurização é um experimento muito mais barato e simples do que uma medição com gás traçador, por exemplo. Muitos experimentos têm demonstrado que a taxa de infiltração de ar aproximada será da ordem de um vinte avos ($1/20$) a taxa de troca de ar à 50Pa (LIDDAMENT, 1981). Dessa forma, a taxa de trocas de ar é expressa de acordo com a Equação 16.

$$Q_{\text{inf}} = \frac{Q_{50}}{20} \quad (16)$$

onde Q_{inf} é a taxa de infiltração (h^{-1});
 Q_{50} é a taxa de troca de ar à 50Pa (h^{-1}).

2.5.1.3 Técnicas de regressão

Como qualquer método de regressão esta técnica é realizada através de um ajuste estatístico de uma série de dados disponíveis. Nesse caso, trata-se de medições de taxas de infiltração e de dados climáticos associados a essas medições. A forma de regressão mais simples pode ser realizada através de uma função linear, onde a infiltração é função da velocidade do vento e da temperatura, como mostra a Equação 17 (LIDDAMENT, 1986):

$$Q_{\text{inf}} = a + b \cdot \Delta T + c \cdot V^2 \quad (17)$$

onde: Q_{inf} é a taxa de infiltração (h^{-1});

ΔT é a diferença entre a temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$);

V é a velocidade do vento (m/s);

a, b, c são os coeficientes de regressão.

A vantagem desse método é que pode ser extrapolado para períodos maiores do que os períodos de medições, que geralmente duram poucos dias, e para outras condições de clima. A desvantagem é que os valores dos coeficientes obtidos são exclusivos para a edificação onde ocorreram as medições.

2.5.1.4 Método da Norma Britânica (*British Standards Method*)

O método da Norma Britânica (BSI, 1991) divide o cálculo da taxa de trocas de ar entre ventilação unilateral e ventilação cruzada. Além disso, pode-se calcular o fluxo de ar devido ao vento e devido à diferença de temperatura.

Para a ventilação unilateral, a parcela devido ao vento é expressa pela Equação 18. A parcela devido à diferença de temperatura é expressa pela Equação 19, quando se tem uma abertura, e pela Equação 20 quando o ar flui através de duas aberturas.

$$Q_w = 0,025 \times A \times V \quad (18)$$

onde: Q_w é o fluxo de ar devido ao vento (m^3/s);

A é a área da abertura (m^2);

V é a velocidade do vento (m/s).

$$Q_{T1} = C_d \cdot \frac{A}{3} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T \cdot g \cdot H_2}{T}} \quad (19)$$

onde: Q_{T1} é o fluxo de ar devido a diferença de temperatura para 1 abertura (m^3/s);

C_d é o coeficiente de descarga;

ΔT é a diferença entre as temperaturas interna e externa (K);

g é a aceleração gravitacional (m^2/s);

H_2 é altura da abertura (m);

A é a área da abertura (m^2).

$$Q_{T2} = C_d \cdot A \left[\frac{\varepsilon \sqrt{2}}{(1 + \varepsilon)(1 + \varepsilon^2)^{1/2}} \right] \cdot \left(\frac{\Delta T \cdot g \cdot H_1}{T} \right) \quad (20)$$

onde: Q_{T2} é o fluxo de ar devido a temperatura para 2 aberturas (m^3/s);

C_d é o coeficiente de descarga;

A é a soma das áreas da aberturas (m^2);

H_1 é a distância vertical entre as aberturas (m);

ε é a razão entre a área das aberturas.

O fluxo de ar para edificações com ventilação cruzada é dividido em duas parcelas. A Equação 21 representa o fluxo de ar devido ao vento e a Equação 22 devido à diferença de temperatura.

$$Q_w = C_d \cdot A_w \cdot V \cdot \sqrt{\Delta C_p} \quad (21)$$

onde: Q_w é o fluxo de ar devido ao vento (m^3/s);

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{A_{ent}^2} + \frac{1}{A_{sai}^2} \quad [m^2];$$

ΔC_p é a diferença entre os valores de C_p do nó de entrada e do nó de saída.

$$Q_b = C_d \cdot A_b \cdot \sqrt{\left(\frac{2\Delta T \cdot g \cdot H_1}{T} \right)} \quad (22)$$

onde: Q_b é o fluxo de ar devido a diferença de temperatura (m^3/s);

$$\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{A_{ent}^2} + \frac{1}{A_{sai}^2}$$

$$T = \frac{T_e + T_i}{2}$$

O fluxo de ar será considerado como consequência do vento ou da diferença de temperatura de acordo com a relação entre o vento e a raiz quadrada da diferença de temperatura:

$Q = Q_b$ para:

$$\frac{V}{\sqrt{\Delta T}} < 0,26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w} \frac{H_1}{\Delta C_p}} \quad (23)$$

$Q = Q_w$ para:

$$\frac{V}{\sqrt{\Delta T}} > 0,26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w} \frac{H_1}{\Delta C_p}} \quad (24)$$

2.5.1.5 Método Aynsley

O método desenvolvido por Aynsley (1982) é utilizado para o cálculo do fluxo de ar através de aberturas em série, através da Equação 25.

$$Q = \sqrt{\frac{(C_{p_1} - C_{p_{n+1}}) \cdot V_Z^2}{\frac{1}{C_{D1}^2 \cdot A_1^2} + \frac{1}{C_{D2}^2 \cdot A_2^2} + \frac{1}{C_{D3}^2 \cdot A_3^2} + \dots + \frac{1}{C_{Dn}^2 \cdot A_n^2}}} \quad (25)$$

onde: C_p é o coeficiente de pressão;

V_Z é a velocidade do vento na altura de referência Z (m/s);

C_D é o coeficiente de descarga;

A é a área da abertura (m^2).

2.5.1.6 Método De Gibbs & Phaff

A partir das medições de trocas de ar realizadas em seu estudo, De Gibbs & Phaff (1982) deduziram uma velocidade efetiva do ar definida como:

$$V_{ef} = \frac{a \cdot V}{\frac{1}{2} \cdot A \cdot 3600} \quad (26)$$

onde: a é o número de trocas de ar por hora medido;

V é o volume do ambiente (m^3);

A é a área efetiva de abertura da janela.

A equação da velocidade efetiva do ar através da janela é dada por:

$$V_{ef} = \sqrt{C_1 \cdot (V_{met})^2 + C_2 \cdot H \cdot \Delta T + C_3} \quad (27)$$

onde: C_1 , C_2 e C_3 são constantes do efeito do vento, flutuação e turbulência do ar;

H é a altura da janela;

ΔT é diferença entre as temperaturas interna e externa;

V_{met} é a velocidade do vento medida na estação metereológica.

As constantes C_1 , C_2 e C_3 foram deduzidas a partir do ajuste dos dados das medições. Rearranjando os termos das Equações 23 e 24 obtém-se o fluxo de ar através de grandes aberturas:

$$Q = \frac{A}{2} \sqrt{0,001 \cdot (V_{met})^2 + 0,0035 \cdot H \cdot \Delta T + 0,01} \quad (28)$$

2.5.2 MÉTODOS TEÓRICOS SIMPLIFICADOS

2.5.2.1 Modelo LBNL

O modelo desenvolvido pelo Lawrence Berkeley National Laboratory aproxima a edificação a um modelo de uma zona onde todas as aberturas são definidas como uma área efetiva de fresta (m^2). A área efetiva de fresta pode ser determinada através do teste de pressurização da edificação ou através de dados presentes em ASHRAE (2001).

O fluxo total é determinado através da raiz quadrada da soma dos quadrados das parcelas do fluxo de ar devido ao efeito chaminé (Q_s), do fluxo de ar devido ao vento (Q_w) e do fluxo de ar devido a um sistema de ventilação mecânica (Q_v):

$$Q_{total} = \sqrt{Q_s^2 + Q_w^2 + Q_v^2} \quad (29)$$

onde: $Q_s = A \cdot f_s \cdot \sqrt{\Delta T}$ é o fluxo de ar devido à diferença de temperatura (m^3/s);

$Q_w = f_w \cdot V_c$ é o fluxo de ar devido ao vento (m^3/s);

Q_v é o fluxo de ar do sistema de ventilação mecânica (m^3/s);

ΔT é a diferença entre as temperaturas interna e externa (K);

V_c é a velocidade do vento na altura de referência (m/s);

f_s e f_w são parâmetros do efeito chaminé e do vento respectivamente.

As expressões que definem os parâmetros f_s e f_w podem ser encontradas em Liddament (1986), bem como outros coeficientes envolvidos nessas equações.

2.5.2.2 Modelo BRE

Através desse método, presente em Liddament (1986), é possível calcular o fluxo de ar em quaisquer condições a partir das características de estanqueidade da edificação determinada através de um teste de pressurização.

$$Q = Q_r \left[\frac{\rho V^2}{\Delta p} \right]^n \cdot F_v(A_r, \phi) \quad (30)$$

onde: Q_T é o fluxo de ar a uma pressão de referência escolhida arbitrariamente (m^3/s);

V é a velocidade do ar na altura da cumeeira (m/s);

Δp é a diferença entre as pressões interna e externa (Pa);

F_v é a função da taxa de infiltração;

A_r é o número de Archimedes;

ϕ é a função da pressão superficial.

Quando apenas o vento está agindo sobre a edificação a equação se reduz a:

$$Q_w = Q_T \left[\frac{\rho V^2}{\Delta p} \right]^n \cdot F_w(\phi) \quad (31)$$

onde: F_w é a função da infiltração devido ao vento.

A função da infiltração devido ao vento, F_w , depende dos coeficientes de pressão das superfícies, enquanto F_v inclui os efeitos dos parâmetros velocidade e temperatura.

2.5.3 MODELOS ZONAIS E DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL – CFD

Os modelos zonais são baseados na hipótese de que o ar das zonas é homogêneo, totalmente misturado. Tanto nos métodos zonais como no CFD, o volume do ar interno é dividido em vários volumes sobre os quais as equações de conservação de massa, energia e momento são discretizadas e resolvidas para derivar os campos de temperatura e velocidade do ar. A diferença é que no método CFD um espaço geométrico é subdividido em um grande número de pequenas células.

O método zonal é uma aproximação intermediária entre os modelos de rede e CFD. Ele tem a vantagem de fornecer resultados detalhados considerando campos de temperatura e velocidade do ar com menos complexibilidade que a modelagem CFD (SANTAMOURIS, 1998).

A Dinâmica dos Fluidos Computacional fornece uma análise detalhada dos caminhos do fluxo de ar, bem como da distribuição das temperaturas e dos contaminantes dentro de um espaço ventilado. Consome mais tempo do que uma aproximação multizona e não fornece os fluxos de ar nas aberturas. Enquanto os modelos de redes fornecem como resultado os valores de

fluxo de ar para cada abertura, o modelo CFD fornece os valores de velocidade e direção dos vetores do ar interno.

O modelo CFD usa um método de volume finito para simultaneamente resolver as equações que governam a conservação de massa, momento e energia. O domínio geométrico é apresentado por grades de células, nas quais as variáveis são definidas no centro. Uma solução de convergência é obtida de modo iterativo (KOENE et al., 2005). Os modelos CFD são extremamente sensíveis às condições de contorno iniciais, as quais nos estudos de ventilação natural são de natureza randômica e desconhecidas (TSANGRASSOULIS et al., 1997), e por esse motivo devem ser utilizados com cautela, já que as condições de conforto dentro das edificações dependem fortemente da distribuição interna de temperaturas, umidade e movimento do ar, bem como da concentração dos poluentes para adequada qualidade do ar interno (SANTAMOURIS, 1998).

2.5.4 MODELOS DE REDE

Num modelo de infiltração multizona a edificação é descrita como uma rede de zonas interconectadas por aberturas (*links*), ou seja, uma rede de campos de pressão. Cada nó (zona) representa um espaço com condições de pressão uniforme dentro ou fora da edificação e a interconexão dos nós corresponde aos impedimentos ao fluxo de ar. Os nós de pressão ou zonas são conectados por resistências não-lineares. Os modelos de rede são comumente baseados na conservação de massa em cada uma das zonas na edificação, que lida com um sistema não-linear de equações de pressão (FEUSTEL & SMITH, 1997).

Esse modelo realiza uma estimativa de toda a taxa de fluxo que entra no prédio. Estima os fluxos individuais nas aberturas, mas não estima o caminho detalhado do fluxo em cada zona. Uma das vantagens é que são compatíveis com muitos programas de modelagem térmica multizona.

Segundo Feustel & Dieris (1992) o primeiro modelo multizona a ser desenvolvido foi publicado em 1970. A partir daí, muitos outros modelos têm sido desenvolvidos: COMIS (FEUSTEL & RAYNOR-HOSEN, 1990), ESP-R (ESRU, 2005), AIRNET (WALTON, 1989), AIOLOS (SANTAMOURIS et al., 1998), CONTAM (NIST, 2005). Mas a maioria deles tem sido escrita como ferramentas de pesquisa. Por esse motivo eles são difíceis de serem utilizados e têm, na melhor das hipóteses, uma interface tolerável ao invés de uma interface amigável. Para Roulet et al. (1999) o usuário pode ser a maior fonte de erros em uma simulação e para

minimizar o risco desses erros ocorrerem, a interface entre o usuário e o código do programa deve apresentar a melhor qualidade possível.

Na atualidade o programa de simulação térmica horária mais utilizado no mundo é o *EnergyPlus*. Ele foi desenvolvido a partir das características e capacidades dos consagrados programas BLAST e DOE-2. O programa possui *links* com outros algoritmos, como WINDOW 5.0, TRNSYS e SPARK. O módulo de balanço de massas de ar trabalha com ventilação, exaustão, e infiltração. Estabelece a zona de ar térmica e avalia o ganho de calor convectivo direto (CRAWLEY et al., 2001).

Além disso, o algoritmo COMIS (FEUSTEL & RAYNOR-HOSEN, 1990) foi incorporado ao *Energyplus*, o que permite a simulação da ventilação natural, juntamente com a simulação térmica da edificação, a partir da sua geometria e das condições climáticas locais. A partir da versão 1.3.0 do programa, o modelo de cálculo do fluxo de ar passou a ser chamado de AirflowNetwork. Esse modelo, além de incluir partes da versão mais recente do COMIS, passou a adotar partes da rotina de cálculo do programa AIRNET (WALTON, 1989). O COMIS foi desenvolvido através de um esforço multinacional e multi-institucional sob supervisão da Agência Internacional de Energia (IEA). O programa AIRNET foi desenvolvido por George Walton do NIST – USA National Institute of Standards and Technology.

Algumas simulações de ambientes não condicionados foram realizadas no Brasil. Wallauer & Beyer (2003), por exemplo, realizou simulações de conforto térmico para uma habitação popular utilizando o arquivo climático de quatro capitais brasileiras: Belém, Brasília, São Paulo e Recife. O conforto foi determinado a partir das simulações realizadas com o programa *EnergyPlus* para duas semanas típicas, uma com a temperatura mais elevada do ano, e outra contendo as temperaturas mais baixas. Para a determinação do conforto térmico é necessário conhecer a velocidade do ar interno. O programa *EnergyPlus* utiliza um modelo multizona que, como todos os modelos multizona, calcula o fluxo de ar entre zonas e o exterior, através de frestas e janelas. No estudo em questão, a velocidade do ar interno foi determinada em cada zona, dividindo-se os fluxos de ar que entraram ou saíram desta zona pela sua seção principal. Esse tipo de aproximação é arriscado, pois a velocidade do ar interno é um parâmetro importante na determinação do PMV. Nesse caso, o mais correto seria utilizar um programa de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), em conjunto com o programa *EnergyPlus*, para o estudo da distribuição interna do ar.

Grings & Beyer (2003) realizaram uma comparação entre os resultados simulados com o programa *EnergyPlus* e os dados medidos de um ambiente condicionado e não-condicionado. Foi produzido um arquivo climático através das medições de radiação solar, velocidade do vento e temperatura, durante um período de 10 dias. Simultaneamente foi realizada a aquisição das temperaturas de uma sala-teste, localizada no terceiro pavimento de um prédio da cidade de Porto Alegre, e das salas adjacentes. A infiltração foi estimada através do método LBNL, descrito no item 2.5.2.1. A diferença máxima ocorrida entre as temperaturas internas medidas e as temperaturas internas simuladas para dois dias não condicionados foi de 1°C e a diferença média foi de 0,5°C. A diferença parece pequena em um primeiro momento, mas ao se acumular durante um período maior de análise pode acarretar em uma distorção dos resultados obtidos. A discordância entre os resultados encontrados foi atribuída a vários fatores como a imprecisão das medições e dos aparelhos de medição e ainda à infiltração, que segundo os autores é difícil de ser estimada ou determinada e merece muitas horas de simulações e ajustes.

MATOS et al. (2006) simularam o desempenho térmico do projeto de uma residência unifamiliar no programa *EnergyPlus*, variando-se: seus componentes construtivos (tipo de parede, cobertura e piso); cores externas; e área de aberturas, considerando a edificação localizada em Florianópolis. Adotaram a quantidade de graus-hora interna e externa como parâmetro de análise para sintetizar e comparar os dados dos 1.920 casos através de rotinas geradas para a automatização da simulação permitindo a realização de milhares de estratégias combinadas. Utilizando-se as mesmas rotinas, as simulações podem ser realizadas para climas de diferentes cidades do país. Na análise de desempenho térmico apresentada, a ventilação natural foi simulada através de um algoritmo multizona (COMIS) integrado ao programa de simulação horária. Porém, o modelo adotado possui suas limitações. Assumiram-se as paredes externas na cor branca e o intervalo de variação dos parâmetros poderia incluir valores de transmitância maiores para as paredes pesadas, porém essa não é a prática construtiva comum. Por outro lado verificou-se pequena influência do tipo de parede no desempenho da residência. O ponto mais crítico do estudo, segundo os autores, foi a escolha da estratégia de ventilação natural adotada.

Para realizar uma simulação no *EnergyPlus* é necessário, inicialmente, modelar a geometria e os componentes construtivos do modelo. A modelagem da geometria é realizada através de coordenadas cartesianas. E os componentes construtivos são tratados como *layers*, ou seja, é necessário criar cada camada constituinte. A maioria das informações necessárias para o cálculo do fluxo de ar é automaticamente extraída da descrição da edificação para a modelagem

térmica. Alguns exemplos são o volume e a altura neutra das zonas, a orientação e localização das superfícies da edificação que contém frestas ou aberturas.

O AirflowNetwork calcula o fluxo de ar entre zonas e o exterior, através de frestas e janelas. No módulo relacionado à ventilação natural são determinados os *links* do fluxo de ar, as características do entorno da edificação, as condições de abertura das janelas e portas e as condições de ventilação. O algoritmo permite que sejam criadas *schedules* (padrões) de controle, de disponibilidade de ventilação, entre outras. O programa pode calcular automaticamente os CPs (Coeficiente de Pressão do Vento). Para isso, é necessário que o prédio em planta tenha formato retangular.

A Figura 8 apresenta a rede de nós de pressão para um ambiente de duas zonas, com aberturas em todas as fachadas. Os nós de pressão estão representados por pontos, vermelhos e azuis, que são conectados por componentes de fluxo de ar (as resistências em vermelho) que representam as aberturas (portas e janelas). Como dito anteriormente, os nós de pressão são volumes da edificação nos quais se assume que o ar será misturado de forma homogênea e a pressão é estacionária, porém essa condição pode não ser sempre adequada para representar a realidade.

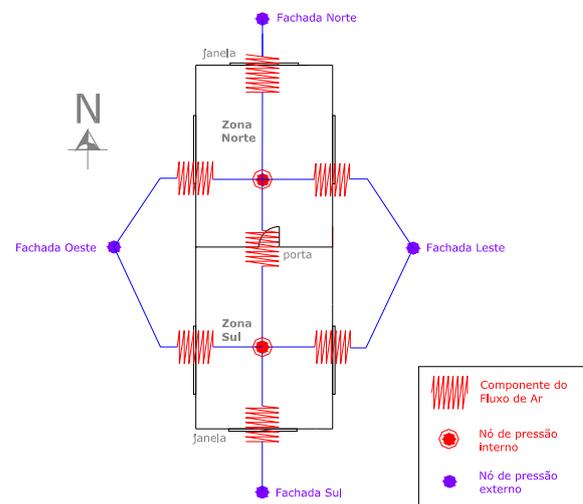


Figura 8 - Esquema da rede de nós de pressão de um modelo de duas zonas.

O cálculo das taxas de infiltração e ventilação necessitam da solução de um sistema de equações não-linear. O método iterativo de Newton-Raphson foi inicialmente adotado pelo algoritmo, e modificado para evitar problemas ocasionais de convergência quando se trabalha com funções exponenciais (FEUSTEL & SMITH, 1997). A solução do sistema de equações não-linear inicia-se com um número de iterações de Newton-Raphson. Esse número de iterações é determinado pelo usuário, os valores usuais são 1 ou 2. O número máximo de iterações permitidas para encontrar uma solução do fluxo de ar é de 500 iterações.

A equação do balanço dos fluxos de massa para a m 'ésima zona com o total de j_m aberturas é:

$$\sum_{im=1}^{jm} \rho_{im} Q_{im} = 0 \quad (\text{kg/s}) \quad (32)$$

ρ_{im} é a densidade do ar através da i 'ésima abertura do m 'ésimo nó. Q_{im} é a taxa de fluxo volumétrica através da i 'ésima abertura do m 'ésimo nó e é dada pela Equação 33:

$$Q_{im} = C_{im} |p_{im} - p_m|^{n_{im}} \left(\frac{p_{im} - p_m}{|p_{im} - p_m|} \right) \quad (33)$$

onde: C_{im} é o coeficiente de descarga da i 'ésima abertura da m 'ésima zona;

n_{im} é o expoente do fluxo da i 'ésima abertura da m 'ésima zona;

p_{im} é a pressão da zona adjacente ao m 'ésimo nó através do qual a i 'ésima abertura se conecta;

p_m é a pressão interna do m 'ésimo nó;

A equação do equilíbrio deve ser aplicada a cada zona. Assumindo um número total de “ q ” zonas, o balanço total é dado por:

$$\sum_{m=1}^q \sum_{im=1}^{jm} \rho_{im} k_{im} |p_{im} - p_m|^{n_{im}} \left(\frac{p_{im} - p_m}{|p_{im} - p_m|} \right) = 0 \quad (34)$$

No programa *EnergyPlus* existe a possibilidade de optar pelo cálculo automático dos C_p s que devem ser utilizado apenas para prédios retangulares. Nesse caso, os valores de C_p s médios da superfície, de acordo com a direção do vento, são calculados pelo programa para as quatro fachadas verticais e para o teto. Os coeficientes de pressão do vento calculados eram apresentados em um dos arquivos de saída do *EnergyPlus*, *eplusout.cif* (COMIS Input File) nas versões mais antigas do programa. Atualmente, com a mudança do modelo de fluxo de ar, o arquivo de saída corresponde aos valores de C_p calculados pelo programa não está disponível. O cálculo dos coeficientes de pressão para edifícios baixos é realizado pelo *EnergyPlus* através da equação 7 multiplicada pelo fator de redução 0,6, resultando na equação 35.

$$C_{p,n} = 0,6 \times \ln \left[\begin{array}{l} 1.248 - 0.703 \sin(a/2) - 1.175 \sin^2(a) \\ + 0,131 \sin^3(2aG) + 0,769 \cos(a/2) \\ + 0,07G^2 \sin^2(a/2) + 0,717 \cos^2(a/2) \end{array} \right] \quad (35)$$

Com relação às aberturas, estas podem ser de dois tipos: abertura retangular e abertura pivotante em torno de um eixo horizontal. O programa gera automaticamente quatro frestas ao redor do perímetro da janela ou porta pelas quais o ar flui quando as portas e janelas estão fechadas. O AirflowNetwork modela o fluxo de ar em duas direções apenas para aberturas verticais. Algumas aberturas podem ter o fluxo de ar simultaneamente em duas diferentes direções dependendo dos efeitos totais e das condições do vento. Atualmente as aberturas não podem ser modeladas com duas ou mais partes, como acontecia nas versões mais antigas.

O programa utiliza fatores de abertura (*Opening Factor*) – pelo menos 2 e no máximo 4 – para definir as diferentes condições de abertura sob as quais uma janela ou porta está submetida dependendo da sua área efetiva. O primeiro valor deve ser zero e o último valor deve ser 1,0. O fator de abertura se refere à fração da janela ou da porta que está aberta, e para cada condição são definidos valores de coeficiente de descarga, fator de largura, fator de altura e altura inicial de abertura. A Figura 9 apresenta os fatores geométricos associados às aberturas. Quando necessário, o programa interpola esses valores para cada intervalo de simulação.

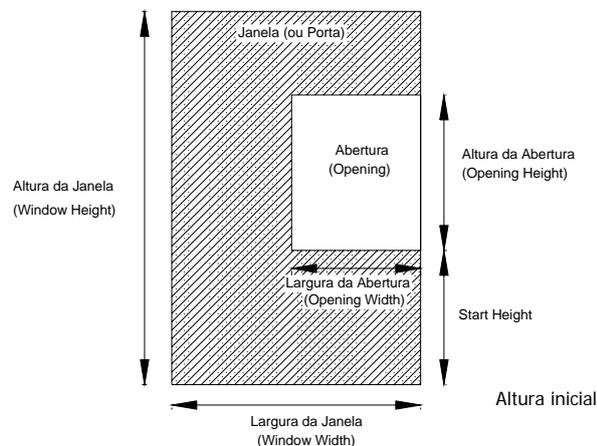


Figura 9. Janela ou porta mostrando os fatores geométricos associados a uma abertura pela qual o ar passa.

O fator de largura de uma janela ou porta é a largura da abertura dividida pela largura da porta ou janela (Equação 36).

$$Fator\ de\ largura = \frac{Largura\ da\ Abertura}{Largura\ da\ Janela\ ou\ Porta} \quad (36)$$

O fator de altura da abertura é a altura da área aberta dividida pela altura da porta ou janela (Equação 37).

$$Fator\ de\ altura = \frac{Altura\ da\ Abertura}{Altura\ da\ Janela\ ou\ Porta} \quad (37)$$

A altura inicial de abertura é a distância entre a base da janela ou porta e a base da área aberta. A soma do fator de altura e da altura inicial de abertura deve ser menor que 1,0 a fim de ter uma abertura na janela ou porta.

Existem cinco tipos de controles de abertura para portas e janelas, disponíveis no programa: ventilação constante, controle zonal, controle através da temperatura, controle através da entalpia e sem ventilação. Dependendo do tipo de controle escolhido é necessário especificar *schedules* de controle. As *schedules* fornecem valores de controle para cada hora do ano e servem para caracterizar os padrões de uso de um determinado sistema ou ocupação do prédio. No que diz respeito à ventilação existem dois tipos: *schedule* de disponibilidade de ventilação e *schedule* de temperatura. A primeira especifica quando a ventilação através de uma porta ou janela é possível de acontecer. Um valor igual a zero significa que a ventilação não é permitida. Um valor maior que zero significa que a ventilação pode ocorrer se outras condições de controle de ventilação forem satisfeitas. A *schedule* de temperatura é uma *schedule* de *set points* de temperatura do ar da zona que é utilizada quando o controle escolhido for através da temperatura ou da entalpia.

A Figura 10 apresenta a relação entre cada controle e o tipo de *schedule* envolvida no processo. O programa verifica o tipo de controle escolhido pelo usuário. Se a escolha do usuário for pelo controle por temperatura ou por entalpia, por exemplo, o programa busca a *schedule* de *set points* de temperatura, e se esta permitir ventilação, o programa então consulta a *schedule* de disponibilidade de ventilação. Se esta *schedule* não apresentar restrição à ventilação para o horário, então ocorrerá a abertura da porta ou janela, ocorrendo dessa forma a ventilação. Se o usuário optar pela ventilação constante, o programa consulta a *schedule* de disponibilidade, verificando a possibilidade de ventilação naquele horário. O controle zonal permite que todas as aberturas pertencentes a uma mesma zona possuam os mesmos critérios de controle. Dessa forma o objeto *Zone Data* é consultado.

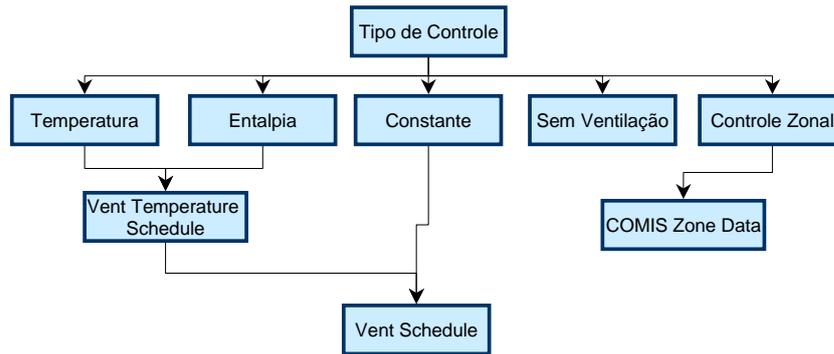


Figura 10 – Relação entre os tipos de controle e *schedules* de controle.

Para simplificar a simulação, vários ambientes de uma edificação podem ser agrupados em uma única zona térmica por possuírem características semelhantes. Uma zona térmica possui um valor homogêneo de pressão e temperatura do ar, ou seja, considera-se que o ar esteja bem misturado.

Os principais dados de saída fornecidos pelo programa relacionados à ventilação natural são: o volume de infiltração em cada zona, ou seja, o volume de ar total proveniente do exterior através das janelas, portas e frestas; o volume de ar proveniente das zonas adjacentes e os valores de fluxo de ar através de cada abertura ou fresta. O *EnergyPlus* fornece os números de trocas de ar horárias, não sendo, portanto necessário o seu cálculo. O programa não fornece a velocidade do vento corrigida.

2.6 RESUMO DO CAPÍTULO

A ventilação natural é muito importante para obter conforto térmico em regiões de clima quente e úmido. Sendo a estratégia bioclimática mais adequada para o clima de Florianópolis, procurou-se apresentar na revisão bibliográfica a teoria dos mecanismos de ventilação natural e ainda alguns métodos de estimativa das taxas de infiltração de ar em uma edificação. Foi realizada uma breve revisão sobre os métodos de medição, a fim de apresentar a complexidade de sua realização. Para encerrar o capítulo, foram apresentados alguns aspectos da ferramenta de simulação utilizada no presente estudo, o programa computacional *EnergyPlus*. Durante a revisão de literatura foram encontrados alguns trabalhos que forneceram resultados quantitativos de trocas de ar, porém a maioria desses dados é de climas frios, ou seja, dados de infiltração que variam de 0,5 a 2 trocas de ar por hora. Para o verão, foram encontrados valores entre 15 e 20 trocas de ar por hora. O ideal seria a realização da calibração do modelo computacional através

da medição da ventilação em uma edificação real. Porém, a falta de equipamentos e o alto custo de aquisição, aliados à complexidade do método de medição impediram a realização dessa etapa.



Capítulo 3

Metodología

3.1 INTRODUÇÃO

A metodologia de pesquisa foi dividida em duas etapas: definição do caso base e definição das alternativas de simulação paramétrica. Na modelagem do caso base foram definidos os parâmetros mais importantes para a realização da simulação computacional: geometria, tipo de envelope, cargas internas, como ocupação, sistema de iluminação e equipamentos; e parâmetros relacionados à ventilação natural, como por exemplo, os valores de coeficientes de pressão, coeficiente de fresta (C_Q) e o coeficiente de descarga (C_D). A definição das alternativas foi baseada nas recomendações da NBR 15220 (ABNT, 2005) para a cidade de Florianópolis.

3.2 DEFINIÇÃO DO CASO BASE

Órgãos públicos, como o IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e Eletrobrás/Procel fornecem informações importantes sobre as habitações residenciais brasileiras através da Pesquisa Nacional de Amostras de Domicílio (PNAD, 2002) realizada junto ao Censo 2000; e através da Pesquisa de Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo (SINPHA, 1999), realizada nos anos de 1997 e 2006. Tavares (2006), no seu estudo, compilou estas informações e definiu protótipos habitacionais de acordo com a faixa de renda familiar. A Tabela 6 apresenta algumas características dessas edificações. As unidades 1, 4 e 5 são representativas de residências unifamiliares e as unidades 2 e 3 representam edificações multifamiliares.

Tabela 6 - Unidades habitacionais por faixa de renda média familiar. Fonte: Tavares(2006)

Unidade	Faixa de renda familiar	Área (m ²)	Nº de quartos	Nº de habitantes	Consumo eletricidade (kWh/mês)
Unidade 1	Até 5 salários	63	2	4	150
Unidade 2	Até 10 salários	70	2	2	200
Unidade 3	Até 20 salários	100	3	3	300
Unidade 4	Até 30 salários	145	3	4	450
Unidade 5	Acima de 30 salários	252	4	5	700

O caso base do presente estudo reuniu algumas características do protótipo habitacional para a família com renda até cinco salários mínimos, ou seja, a unidade habitacional 1, pois algumas modificações e complementações foram realizadas para adequar o modelo à simulação.

3.2.1 GEOMETRIA

O caso base possui área total de 63m², dividida em 2 quartos, sala, cozinha e banheiro, como mostra a Figura 11. O pé direito da edificação é de 2,8m.

O consumo de energia elétrica para esse tipo de residência foi estimado em 150kWh/mês. A orientação do modelo foi definida a partir da preferência de incidência solar nos dormitórios durante o período da manhã.

Nos programas de análise térmica, como o *EnergyPlus*, é necessário a definição das zonas térmicas do modelo. Nesse caso cada cômodo da edificação foi definido como uma zona térmica, ou seja, um volume de ar que possui as mesma temperatura e pressão.



Figura 11 – Planta baixa do caso base.

3.2.2 ENVELOPE

As paredes do modelo (Figura 12) são em blocos cerâmicos de 8 furos (10cm x 20cm x 20cm), com espessura total de 15cm, sendo 10cm do bloco, 2,5cm de reboco interno e 2,5cm de reboco externo, e argamassa de assentamento de 1,0cm de espessura.

A pintura é na cor branca, absorvância (α) de 0,20. A transmitância total da parede é de 2,24 W/m².K. A capacidade térmica é 167 kJ/m².K e o atraso térmico é de 3,7 horas (ABNT, 2005).

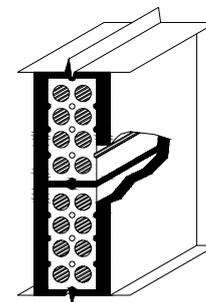


Figura 12 – Corte da parede em bloco cerâmico.

A cobertura do modelo (Figura 13) é composta por laje armada em blocos cerâmicos, com espessura total de 12 cm, rebocada; telhas de fibro-cimento, 0,7cm, consideradas escurecidas com o tempo ($\alpha=0,8$). Transmitância térmica de 1,93 W/m²K. A capacidade térmica é 106 kJ/ m².K, e o atraso térmico é 3,6 horas (ABNT, 2005).

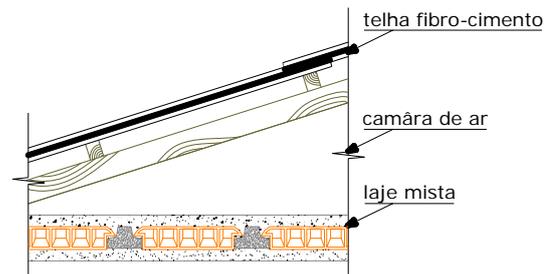


Figura 13 – Corte da cobertura em laje e fibrocimento.

O piso do banheiro e da cozinha é revestido de cerâmica esmaltada e os demais cômodos de tacos de madeira.

As janelas possuem vidro simples de 3mm de espessura, sem proteções solares internas ou externas. A área destinada à iluminação natural é de 1/6 da área do piso, área mínima exigida no código de obras da cidade de Florianópolis; e a área destinada à ventilação é de 50% da área de janela. Nas simulações, as esquadrias foram desprezadas.

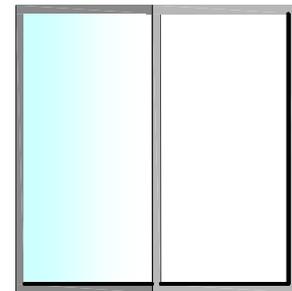


Figura 14 – Área de abertura para ventilação de 8% da área do piso.

3.2.3 OCUPAÇÃO

O padrão de ocupação do modelo representa uma família composta por quatro habitantes: 1 casal e 2 filhos que estudam no período da manhã. Os quartos são ocupados por no máximo duas pessoas. A sala e a cozinha são utilizadas por toda a família, ou seja, quatro pessoas e a ocupação máxima do banheiro é de 1 habitante.

Os padrões de ocupação foram modelados de forma distinta para os dias úteis, apresentado no lado esquerdo da Figura 15 e para os finais de semana, apresentado no lado direito da Figura 15. Nesses gráficos, os ambientes da residência são representados por cores distintas e o eixo das ordenadas representa o número total de ocupantes. Por exemplo, nos dias úteis o quarto de solteiro e o quarto de casal são ocupados por duas pessoas cada um, entre 21h e 7h, totalizando quatro pessoas na residência.

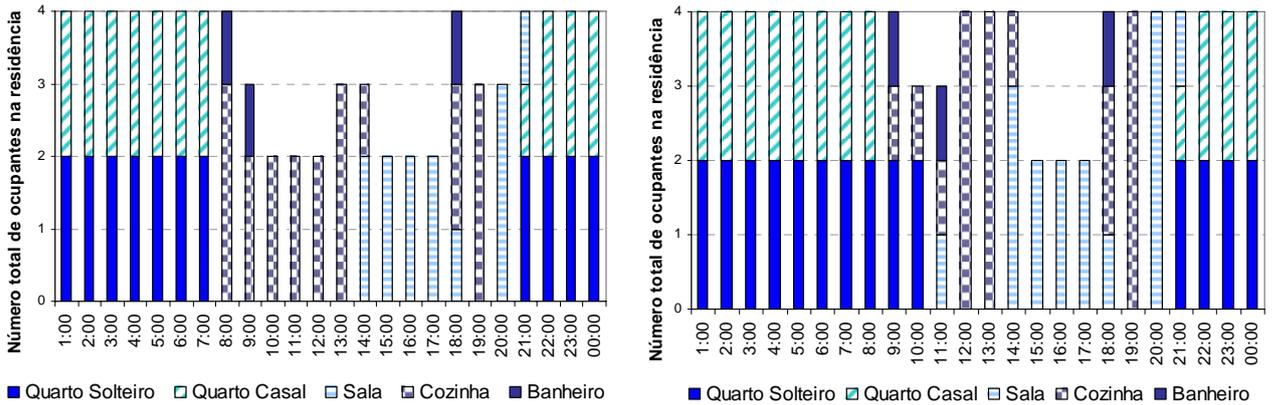


Figura 15 - Padrões de ocupação da unidade 1, dias úteis (esquerda) e finais de semana (direita).

3.2.4 ILUMINAÇÃO

Um padrão de uso de iluminação foi desenvolvido para cada cômodo da edificação em função da ocupação considerada para os dias úteis (Figura 16 - esquerda) e para os finais de semana (Figura 16 – direita). Para os dias de semana, os dormitórios apresentam o mesmo padrão de uso: entre 6h e 7h e entre 20h e 22h. Nos finais de semana, as luzes do quarto de solteiro permanecem acesas das 9h às 10h e entre 20h e 22h. Diferentemente das luzes do quarto de casal, que são acesas das 7h às 8h e entre 20h e 23h. As luzes dos dormitórios e da sala foram consideradas simultaneamente acesas às 21h, pois a ocupação considerada para esse horário é máxima para o quarto de solteiro, mas de 50% para o quarto de casal e 25% para a sala.

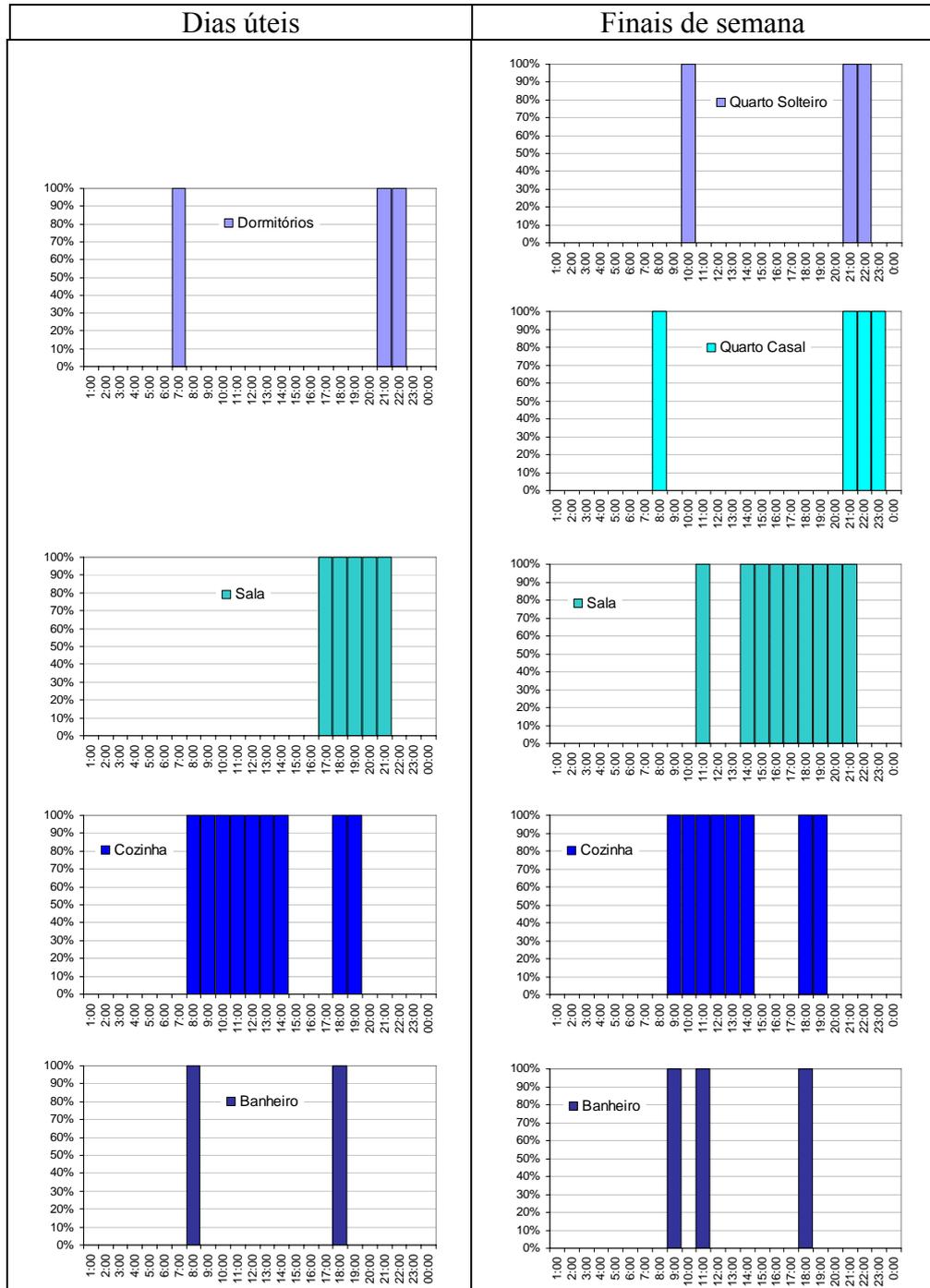


Figura 16 - Padrões de uso em iluminação para os dias úteis (esquerda) e para os finais de semana (direita).

A Tabela 7 apresenta a densidade de potência em iluminação instalada em cada cômodo. Nos dormitórios foram instalados 60W e na cozinha e na sala, 100W. A potência instalada no banheiro é de 40W. A densidade de potência média é de 5,7W/m². O consumo médio mensal estimado para o sistema de iluminação é de 60 kWh/mês.

Tabela 7 - Densidade de potência em iluminação instalada em cada ambiente da unidade 1.

Cômodo	Quarto Solteiro	Quarto Casal	Sala	Cozinha	Banheiro	Total
Potência (W)	60	60	100	100	40	360
Área (m²)	12,0	15,0	22,7	9,0	4,3	63,0
Densidade de potência (W/m²)	5,0	4,0	4,4	11,1	9,4	5,7

3.2.5 EQUIPAMENTOS

Para esse tipo de residência, Tavares (2006) sugere que os equipamentos instalados sejam os seguintes: aparelho de som, chuveiro elétrico, ferro de passar, fogão, refrigerador, liquidificador, televisão e ventilador. Os tempos médios de utilização de cada equipamento foram estimados com base na tabela de consumo de eletrodomésticos do PROCEL (PROCEL, 2005). A partir daí, foi realizado o cálculo do consumo médio diário de cada equipamento considerando o seu tempo de uso. No modelo simulado, uma *schedule* considera o uso contínuo dos equipamentos, baseado no consumo médio diário calculado, apresentado na Tabela 8. O consumo mensal de energia elétrica para esse tipo de residência é de 150kWh. O consumo total dos equipamentos é de 87,8 kWh/mês. Considerando também o sistema de iluminação, o consumo médio simulado para o modelo foi de 151kWh/mês, muito próximo do consumo mensal médio estimado por Tavares (2006) para esse tipo de edificação, 150kWh, que foi utilizado como parâmetro para a calibração do modelo.

Tabela 8 - Potência média dos equipamentos, tempo médio de utilização e consumo médio mensal e diário.

Aparelhos Elétricos	Potência Média (W)	Média de Utilização			Dias Estimados de Uso/Mês	Consumo Médio Mensal (kWh)	Consumo Médio Diário (kWh)
		Tempo	Unidade	(Horas/Dia)			
Chuveiro	3500	7	min/banho	0,47	30	49,00	0,068
Refrigerador	33,19	24	horas/dia	24,00	30	23,90	0,033
Aparelho de Som	20	1	hora/dia	1,00	30	0,60	
Ferro de Passar	300	3	horas/semana	0,43	30	3,86	
Fogão convencional	60	5	min/dia	0,21	30	0,38	
Liquidificador	300	1	hora/mês	0,03	30	0,30	0,021
TV em cores 14"	60	4	horas/dia	4,00	30	7,20	
Ventilador	65	40	horas/mês	1,33	30	2,60	

Excluindo-se o chuveiro e o refrigerador, todos os outros equipamentos foram agrupados numa única zona que representa a sala. O calor gerado por esses equipamentos e pelo chuveiro não foi considerado no balanço térmico da edificação, apenas no consumo; ao contrário do calor

gerado pelo refrigerador que foi considerado na zona que representa a cozinha. O programa *EnergyPlus* não tem capacidade para modelar as correntes de convecção geradas pela grande diferença de temperatura do ar, quando o chuveiro é ligado, que dissipam rapidamente o calor gerado por esse equipamento. Além disso, o fluxo de umidade através do envelope da edificação também não é modelado corretamente.

3.2.6 VENTILAÇÃO

Foi adotada a rotina de ventilação diurna para o caso base. Nessa rotina as janelas permanecem abertas entre 7h e 22h durante o verão e a primavera, entre 7h e 18h no outono, e fechadas no inverno. As portas internas permanecem abertas durante as 24 horas do dia, enquanto as portas externas permanecem fechadas.

Foram definidos três fatores de abertura para a modelagem da janela do caso base, pois, nesse caso, a área de abertura é metade da área de janela. Dessa forma, o fator de abertura igual a zero considera a janela fechada, o valor de 0,5 representa uma área de abertura de 50% e o valor de 1 está relacionado à 100% de abertura. Para as portas, foram definidos apenas dois fatores de abertura: zero e 1. O fator de abertura zero considera a porta fechada e o valor 1 representa a porta totalmente aberta. A Tabela 9 apresenta os valores de coeficientes de descarga, escolhidos com base na revisão bibliográfica, fator de largura, fator de altura e altura inicial de abertura para cada fator de abertura definido para as janelas e porta interna.

Tabela 9 - Valores de coeficientes de descarga, fator de largura, fator de altura e altura inicial de abertura de acordo com o fator de abertura.

	Janelas			Portas	
Fator de abertura	0	0,5	1	0	1
Coefficiente de descarga	-	0,6	0,6	-	0,65
Fator de largura	0	0,5	1	0	1
Fator de altura	1	1	1	1	1
Altura inicial de abertura	0	0	0	0	0

Quando as portas e janelas estão fechadas (fator de abertura é igual à zero), o ar flui através de quatro frestas geradas automaticamente ao redor das aberturas. Os parâmetros que definem o fluxo de ar através de frestas são o coeficiente C_Q e o expoente n . O valor de C_Q adotado nas simulações para a janela de correr, não selada, foi de 0,0006 kg/s.m, e o valor do expoente n foi de 0,66. Para a porta de pivotante, os valores adotados foram 0,0044 kg/s.m para o C_Q e 0,66 para o expoente n .

Os valores dos coeficientes de pressão, utilizados nas simulações, foram calculados através do programa *CP Generator*, e são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores dos coeficientes de pressão utilizados nas simulações.

Direção	Fachada				Teto
	Norte	Leste	Sul	Oeste	
0°	0,603	-0,384	-0,523	-0,384	-0,727
30°	0,468	0,127	-0,538	-0,534	-0,617
60°	0,111	0,469	-0,858	-0,263	-0,537
90°	-0,501	0,603	-0,501	-0,231	-0,598
120°	-0,858	0,469	0,111	-0,263	-0,537
150°	-0,538	0,127	0,468	-0,534	-0,617
180°	-0,523	-0,384	0,603	-0,384	-0,727
210°	-0,538	-0,534	0,468	0,127	-0,617
240°	-0,858	-0,263	0,111	0,469	-0,537
270°	-0,501	-0,231	-0,501	0,603	-0,598
300°	0,111	-0,263	-0,858	0,469	-0,537
330°	0,468	-0,534	-0,538	0,127	-0,617

Os valores de Coeficiente de pressão foram calculados considerando uma distribuição de residências em um conjunto habitacional. A Figura 17 apresenta os oito obstáculos criados em torno do modelo. A distância horizontal entre eles é de 7m e a distância vertical é de 9m.

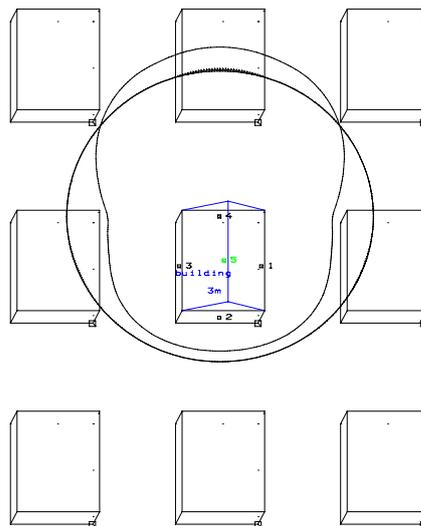


Figura 17 – Obstáculos criados no programa *CP Generator* para o cálculo dos coeficientes de pressão.

3.3 ALTERNATIVAS DE SIMULAÇÃO

A definição das alternativas para a simulação do modelo de residência unifamiliar foi norteada pelas recomendações da terceira parte da NBR 15220 (ABNT, 2005) para a zona bioclimática 3, na qual se enquadra a cidade de Florianópolis. Porém, alternativas fora dos limites estabelecidos pela norma foram consideradas a fim de obter-se resultados mais abrangentes.

De acordo com a norma, para promover ventilação adequada para a cidade de Florianópolis, as aberturas devem ser de tamanho médio: a área de abertura deve variar entre 15% e 25% da área do piso de cada cômodo. Devem-se sombrear as aberturas no verão e permitir entrada de sol durante o inverno. Com relação às vedações externas, a parede deve ser leve e refletora, ou seja, ter uma transmitância térmica (U) menor ou igual a $3,60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, atraso térmico (ϕ) de até 4,3 h, e Fator de Ganho de Calor Solar (FCS) menor ou igual a 4,0. A cobertura deve ser leve e isolada, para isso deve ter U menor ou igual a $2,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, ϕ de até 3,3h e FCS menor ou igual a 6,5.

As alternativas adotadas nas simulações consistem em alterar a área de ventilação; sombrear as janelas; variar a transmitância térmica de paredes e cobertura; verificar a influência da orientação no desempenho térmico das residências; e variar a absorvância de paredes e cobertura. Além disso, foram definidas diferentes estratégias de ventilação. Os padrões de uso de iluminação e equipamentos e o padrão de ocupação não foram alterados. Os valores definidos para cada um dos parâmetros simulados são descritos abaixo.

3.3.1 ORIENTAÇÃO DOS MODELOS

A orientação diferenciada de cada um dos cômodos da residência pode influenciar o comportamento térmico dos mesmos. Por isso, foram definidas três diferentes orientações para os dormitórios: norte, sul e oeste; além da orientação leste do caso base.

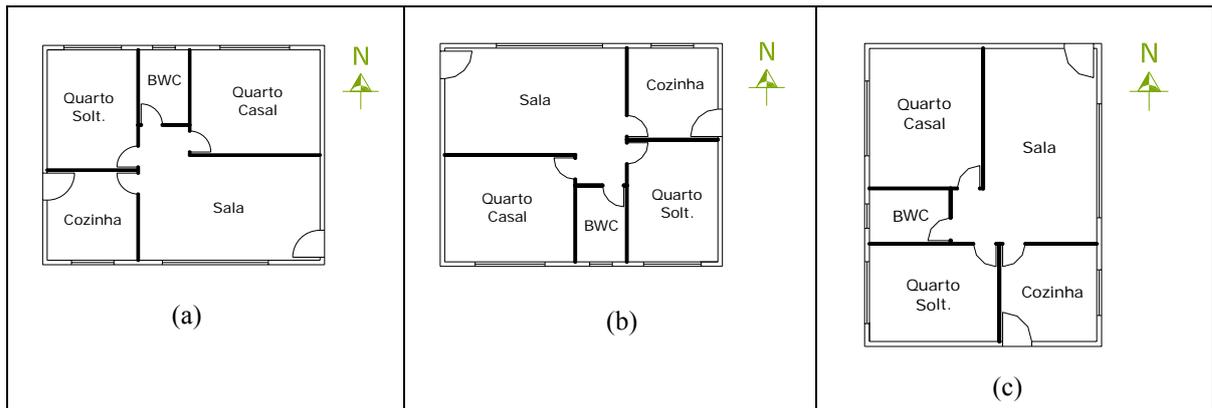


Figura 18 – Diferentes orientações para o caso base.

3.3.2 TIPOS DE COBERTURA

Foram definidas três diferentes composições para a variação da cobertura:

- Cobertura de telha de barro com forro de concreto e lâmina de alumínio polido sobre o forro;
- Cobertura de telha de barro com lã de vidro sobre forro de madeira;
- Cobertura de telha de fibro-cimento sem forro.

A absorvância da cobertura variou em 20%, 40% e 60%. As propriedades térmicas das coberturas foram extraídas da NRB 15220 (ABNT, 2005). A cobertura composta por telha de barro, lâmina de alumínio polido e forro de concreto, apresentada na Figura 19, possui atraso térmico superior ao recomendado pela norma NBR15220. O atraso térmico dessa composição é de 4,2 horas, enquanto que a norma recomenda o valor máximo de 3,3h. A transmitância total é de $1,18\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ e a capacidade térmica é $84\text{ kJ/ m}^2\cdot\text{K}$. Foi considerado o valor de 1,0cm para a espessura da telha. O forro de concreto tem 3,0cm de espessura.

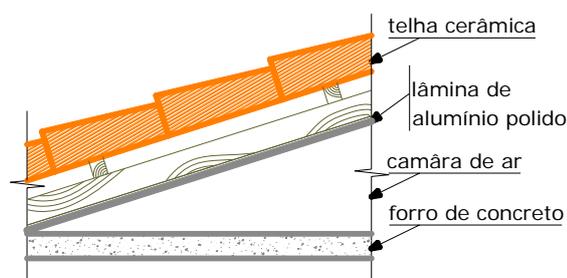


Figura 19 - Cobertura composta por telha de barro, alumínio polido e forro de concreto.

A Figura 20 apresenta o esquema da cobertura composta por telha de barro, 1,0cm de espessura, e lã de vidro, espessura de 5,0cm, sobre forro de madeira, 0,7cm de espessura. A capacidade térmica é de 34 kJ/ m².K, a transmitância total é de 0,62W/m².K e o atraso térmico é de 3,1 horas.

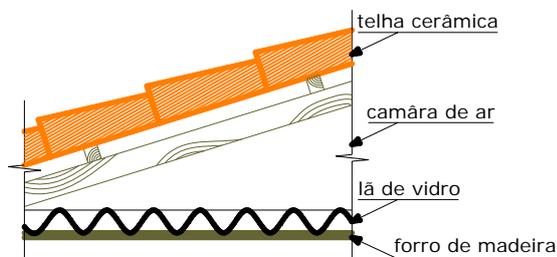


Figura 20 - Cobertura de telha de barro com lã de vidro sobre forro de madeira.

A cobertura de telha de fibro-cimento sem forro, Figura 21, apresenta valor de transmitância superior ao limite da norma. A transmitância térmica dessa cobertura é de 4,6W/m².K, superior ao limite máximo estabelecido de 2,0W/m².K. A espessura da telha é 1,0cm. A capacidade térmica é de 11 kJ/ m².K e o atraso térmico é de apenas 0,2 hora. Essa é uma cobertura muito usada pela população de baixa renda devido ao baixo custo do produto.

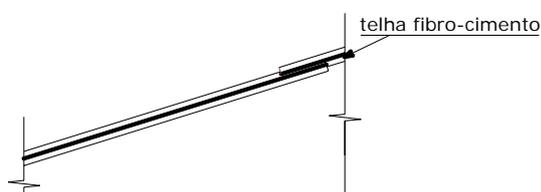


Figura 21 - Cobertura de telha de fibro-cimento sem forro.

Para a absorvância da cobertura (α) foram definidos três valores, quais sejam, 60%, 40% e 20%. O valor de absorvância do caso base é de 80%.

3.3.3 TIPOS DE PAREDES

Foram modelados, no total, cinco tipos de paredes. Três delas possuem capacidade térmica, e são denominadas paredes pesadas. As outras duas paredes não possuem capacidade térmica, e são chamadas de paredes leves. Foi assumido que as paredes internas do modelo são iguais às paredes externas, apesar de saber-se que em alguns casos, dependendo do tipo de envelope, essa prática não é a adotada. As propriedades térmicas das paredes e as considerações com relação aos materiais utilizados (espessura, condutividade, etc.) são os mesmos adotados na NBR 15220 (ABNT, 2005).

3.3.3.1 Paredes modeladas com capacidade térmica

As paredes modeladas com capacidade térmica são:

- a) Parede de concreto maciço;
- b) Parede de tijolos de oito furos quadrados, assentados na maior dimensão;
- c) Parede dupla de tijolos de oito furos circulares, assentados na maior dimensão.

A parede de concreto maciço possui espessura total de 5,0cm e é apresentada na Figura 22. Possui transmitância de $5,04\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, superior ao limite de $3,6\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ sugerido pela NBR 15220 (ABNT, 2005). A capacidade térmica é $120\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$ e o atraso térmico é de 1,3 hora.

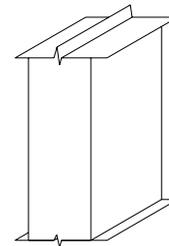


Figura 22 - Parede de concreto maciço.

A parede de tijolos de oito furos quadrados, assentados na maior dimensão (Figura 23), e a parede dupla de tijolos de 8 furos circulares, também assentados na maior dimensão (Figura 24) possuem atraso térmico superior ao limite da norma, que é de 3,3 horas. O atraso térmico da primeira é de 5,5 horas e o atraso térmico da segunda é de 10,8 horas.

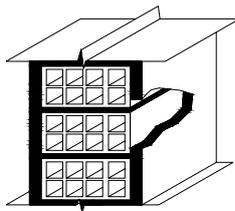


Figura 23 - Parede de tijolos de oito furos quadrados, assentados na maior dimensão.

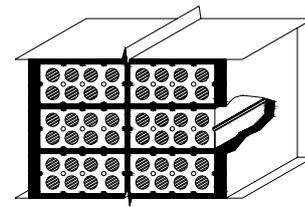


Figura 24 - Parede dupla de tijolos de 8 furos circulares, assentados na maior dimensão.

A parede simples possui espessura total de 24cm, sendo 19cm do tijolo (9x19x19cm) e 5cm da argamassa de emboço (2,5cm de cada lado). A espessura da argamassa de assentamento é de 1,0cm. A transmitância total do elemento construtivo é de $1,80\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ e a capacidade térmica é $231\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$.

A parede dupla possui transmitância total de $1,0\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. O tijolo possui as dimensões de 10x20x20cm e a espessura da argamassa de assentamento é 1,0cm, enquanto que a espessura da

argamassa de emboço é igual a 2,5cm. Portanto, a espessura total da parede é 46cm. A capacidade térmica do componente é 368 kJ/m².K.

3.3.3.2 Paredes modeladas sem capacidade térmica

As paredes leves foram modeladas como um objeto Regular:R, que considera apenas sua resistência térmica. Ou seja, a capacidade térmica desse tipo de parede é nula. As paredes são:

- a) Parede 1: transmitância de 0,25 W/m².K;
- b) Parede 2: transmitância de 1,20 W/m².K.

3.3.4 ÁREA DE JANELA E ABERTURA PARA VENTILAÇÃO

Foram simuladas três diferentes áreas de janela, que se entende por uma determinada área que propicie a iluminação natural no ambiente, quais sejam, 15%, 20% e 25% da área de piso do cômodo em questão. A área destinada à ventilação é igual à área destinada à iluminação. Como resultado, três alternativas de área de ventilação foram modeladas: 15%, 20% e 25% da área do piso de acordo com a Figura 25. O valor do coeficiente de descarga adotado para as janelas foi de 0,6.

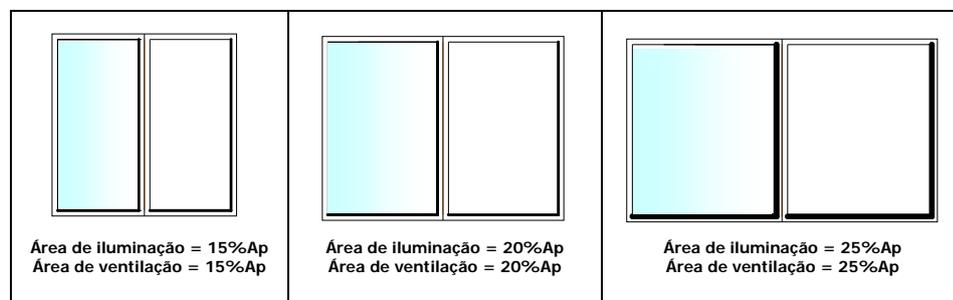


Figura 25 – Alternativas de área de abertura para iluminação e ventilação.

3.3.5 VENTILAÇÃO

Quatro estratégias de ventilação foram adotadas para as simulações: ventilação seletiva diurna, ventilação noturna, ventilação seletiva noturna e ventilação seletiva. Nas estratégias de ventilação seletiva, as janelas só podem ser abertas se obedecerem a determinados critérios adotados, durante os períodos especificados. Nas ventilações diurna e noturna a área de ventilação é constante durante os períodos adotados. Para todas as simulações, as portas internas permaneceram abertas durante as 24 horas do dia, enquanto que as portas externas permaneceram fechadas.

3.3.5.1 Ventilação seletiva

Na rotina de ventilação seletiva, uma *schedule* especifica quando a ventilação através da janela pode ser possível. A abertura das janelas é controlada através de uma temperatura de *setpoint*.

A janela é aberta quando a temperatura interna do ar é igual ou superior à temperatura de *setpoint* ($T_{int} \geq T_{setpoint}$) e quando a temperatura do ar interno é superior à temperatura externa ($T_{int} \geq T_{ext}$). Portanto, essas duas condições devem ser satisfeitas para que possa ocorrer a ventilação. Após a análise de diferentes temperaturas de controle que proporcionassem o melhor aproveitamento da ventilação natural, duas temperaturas de *setpoints* foram assumidas para os períodos de inverno (21/03 à 20/09) e verão (21/09 a 20/03). Para o inverno a temperatura foi de 24°C, e para o verão foi de 15°C. A temperatura de *setpoint* de 24°C para o período de inverno, tende a manter as janelas fechadas durante esse período, evitando a entrada de ar frio para o ambiente.

3.3.5.2 Ventilação seletiva diurna

Nessa rotina as janelas podem ser abertas entre 7h e 22h durante todo o ano, se atender às condições determinadas na ventilação seletiva.

3.3.5.3 Ventilação seletiva noturna

A ventilação seletiva noturna, igualmente à ventilação seletiva, restringe a abertura das janelas quando as condições de temperaturas não forem atendidas. Porém, por se tratar de uma estratégia de ventilação noturna, a abertura das janelas é possível a partir das 18h até às 7h do dia seguinte para os períodos de verão e primavera. Durante o outono e o inverno, as janelas permanecem fechadas, sem ventilação noturna ou diurna, tendo apenas infiltração de ar pelas frestas.

3.3.5.4 Ventilação noturna

Na ventilação noturna, as janelas são abertas a partir das 18h até às 7h do dia seguinte durante o verão e a primavera, e fechadas durante o outono e o inverno.

3.3.6 SOMBREAMENTO DAS ABERTURAS

O modelo de fluxo de ar do programa *EnergyPlus* assume que a passagem de ar através de uma janela aberta não é afetada pela possível presença de um dispositivo de sombreamento,

tal como uma persiana ou veneziana. O módulo térmico assume que a área envidraçada é constante, considerando a janela sempre fechada para o cálculo da transferência de calor por condução e ganho solar. Os dois módulos do programa interagem através da troca de dados a cada *timestep*.

O sombreamento das aberturas ocorreu entre 8h e 18h durante os períodos de verão e primavera (21/09 à 20/03). O dispositivo de sombreamento adotado foi uma veneziana horizontal de madeira na cor branca, refletância de 0,8, cuja condutividade térmica é de 0,23W/m.K.

Foram simulados casos com sombreamento e sem sombreamento. Devido à limitação do programa em compatibilizar o módulo térmico e o módulo de infiltração, os casos com sombreamento não representam a ventilação através de uma veneziana. Dessa forma, foi utilizado um artifício para representar o impedimento ao fluxo de ar. O programa possui uma opção que permite a utilização de frestas extras nas aberturas quando estas estão fechadas. Não existem controles para fechar ou abrir frestas, por isso os casos em questão foram simulados com as janelas fechadas durante todo o ano. Dessa forma, foi necessária a realização de duas simulações: a primeira considerando-se a janela fechada sem sombreamento, ou seja, com frestas somente ao redor da janela; e outra simulação com as janelas do modelo fechadas, com sombreamento e frestas extras. Os resultados para os períodos de outono e inverno foram extraídos da primeira simulação e os resultados referentes à primavera e ao verão foram obtidos da segunda simulação, supondo-se que apresentam o mesmo comportamento da janela com sombreamento.

Foram realizadas contagens expeditas em venezianas de madeira para determinação das dimensões e espaçamentos das aletas. Cada espaçamento entre as aletas da veneziana foi considerado uma fresta para poder representá-la. O resultado encontrado foi de que um metro de altura de veneziana possui 28 espaços entre as aletas, ou seja, 28 frestas que possuem o comprimento igual à largura da janela. O valor do comprimento de fresta foi determinado para cada abertura a partir das suas dimensões. Os resultados podem ser observados na Tabela 11. A maior parte das janelas possui altura de 1,1m, as exceções são as janelas da sala que possuem 1,2m de altura quando as áreas de janela são 20% e 25%.

Tabela 11 – Valores de comprimento de fresta adotados para cada área de abertura para ventilação na tentativa de representar uma veneziana.

Janela - Área de ventilação	8% área do piso		15% área do piso		20% área do piso		25% área do piso	
	L (m)	Comp. Fresta (m)	L (m)	Comp. Fresta (m)	L (m)	Comp. Fresta (m)	L (m)	Comp. Fresta (m)
Cozinha	0,7	21	1,4	42	1,7	51	2,1	63
Dorm Solt	0,9	28	1,8	56	2,2	68	2,8	85
Dorm Casal	1,1	35	2,3	70	2,8	85	3,5	106
Sala	1,7	53	3,4	106	3,8	128	4,8	160

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos serão analisados através do número de graus-hora. O parâmetro “graus-hora” é definido como sendo o somatório da diferença de temperatura horária, quando esta se encontra acima de uma temperatura base, no caso de resfriamento ou abaixo da temperatura base, para graus-hora de aquecimento. A Figura 26 apresenta uma representação desse parâmetro. A área hachurada em vermelho, acima da linha de temperatura de 26°C, representa a quantidade de graus-hora de resfriamento e a área hachurada em azul, abaixo da linha de temperatura de 20°C, representa a quantidade de graus-hora de aquecimento.

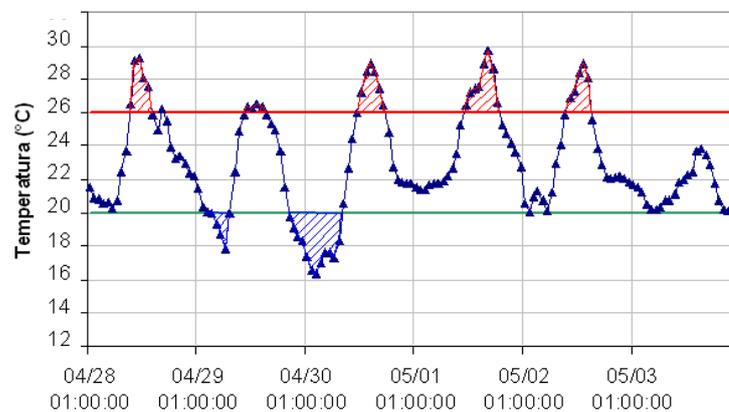


Figura 26 – Temperatura horária para representação de graus-hora de aquecimento e resfriamento.

O número de graus-hora geralmente é calculado para as temperaturas do ar. Porém, a quantidade de graus-hora, nesse caso, será calculada para as temperaturas operativas, para levar em consideração a temperatura radiante média. A temperatura operativa é representada pela equação 34.

$$T_o = A \cdot T_a + (1 - A) \cdot T_r \quad (34)$$

onde: T_a é a temperatura do ar (°C);

T_r é a temperatura radiante média (°C);

sendo: $A=0,5$ para $V_{ar}<0,2\text{m/s}$;

$A=0,6$ para V_{ar} de $0,2\text{m/s}$ a $0,6\text{m/s}$;

$A=0,7$ para V_{ar} de $0,6\text{m/s}$ a $1,0\text{m/s}$;

A temperatura operativa foi calculada como sendo o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média, ou seja, utilizou o coeficiente de 0,5 na equação acima.

Os limites de conforto para a temperatura operativa foram obtidos a partir do Anexo D da ISO 7730/94 para atividades leves (70W/m^2). Para as condições de inverno, período de aquecimento, onde é assumido que o isolamento térmico das roupas é igual a 1 clo, a temperatura operativa deve situar-se entre 20°C e 24°C . Para as condições de verão, período de resfriamento, onde é assumido que o isolamento térmico das roupas é igual a 0,5 clo, a temperatura operativa deve ser entre 23°C e 26°C . Dessa forma, a temperatura base para o cálculo de graus-hora de resfriamento foi de 26°C , e a temperatura base para o cálculo de graus-hora de aquecimento foi de 20°C . A Equação 35 e a Equação 36 foram utilizadas para calcular a quantidade de graus-hora para a temperatura operativa.

$$\text{GrausHora}_{\text{resf}} = \sum (T_h - 26^\circ\text{C}) \quad (35)$$

$$\text{GrausHora}_{\text{aquec}} = \sum (20^\circ\text{C} - T_h) \quad (36)$$

onde: T_h é a temperatura em um determinado horário [°C];

Os valores de graus-hora de resfriamento foram obtidos para o período compreendido entre 21/09 e 20/03, e os valores de graus de aquecimento são integrados ao longo dos dias 21/03 e 20/09. Somadas, as quantidades de graus-hora de resfriamento e graus-hora de aquecimento geram o valor de graus-hora anual para os cômodos representativos da residência, ou seja, dormitório e sala.

3.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentadas as características do caso base e as descrições dos parâmetros das alternativas adotadas nas simulações. A Tabela 12 apresenta o resumo dos valores adotados para cada variável.

Tabela 12 – Resumo das alternativas de simulação.

Parâmetros	Alternativa	Caso Base
Abertura para iluminação	15%Ap, 20%Ap e 25%Ap	15%Ap
Abertura para ventilação	8%Ap, 15%Ap, 20%Ap e 25%Ap	8%Ap
Sombreamento	Sim e não	não
Tipo de parede	5cm de concreto maciço ($U=5,4W/m^2.K$)	tijolos de 8 furos circulares assentados na menor dimensão ($U=2,24W/m^2.K$)
	tijolos de 8 furos quadrados assentados na maior dimensão ($U=1,80W/m^2.K$)	
	dupla de tijolos de 8 furos circulares, assentados na maior dimensão ($U=1,0W/m^2.K$)	
	parede leve 1 ($U=0,25W/m^2.K$)	
	parede leve 2 ($U=1,2W/m^2.K$)	
Tipo de cobertura	telha de barro, lâmina de alumínio polido e forro de concreto ($U=1,18W/m^2.K$)	laje mista coberta com telha de fibrocimento ($U=1,93W/m^2.K$)
	telha de barro com lâ de vidro sobre forro de madeira ($U=0,62W/m^2.K$)	
	telha de fibro-cimento sem forro ($U=4,6W/m^2.K$)	
Absortância da cobertura	20%, 40%, 60%	80%
Orientação dos dormitórios	norte, sul e oeste	leste
Estratégia de ventilação	noturna, diurna seletiva e noturna seletiva	diurna



Capítulo 4

*R*esultados

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta, em primeiro lugar, os resultados referentes ao caso base. Os fluxos de calor, as temperaturas internas e o número de trocas de ar horárias foram analisados para os dias de temperatura externa máxima e mínima, que ocorrem, respectivamente, nos dias 8 de janeiro e 6 de agosto do arquivo TRY.

Após a avaliação do caso base, inicia-se a apresentação dos resultados das simulações paramétricas. Os parâmetros analisados foram: a orientação do modelo, a absorvância e a transmitância da cobertura e das paredes, a área de abertura destinada à ventilação, o sombreamento dessas aberturas e o tipo de ventilação.

4.2 CASO BASE

Como foi explicado no capítulo anterior, o caso base possui as paredes em blocos cerâmicos rebocados e a pintura é na cor branca, absorvância (α) de 0,20. A transmitância total da parede é de 2,24 W/m²K. A cobertura possui transmitância térmica de 1,93 W/m²K, e é composta por laje mista e telhas de fibro-cimento, consideradas escurecidas com o tempo ($\alpha=0,8$). As janelas permanecem abertas entre 7h e 22h no verão e primavera, das 7h às 18h no outono e fechadas no inverno. As aberturas não são sombreadas. A orientação dos dormitórios é leste.

4.2.1 TEMPERATURAS DO AR E FLUXOS DE CALOR

De acordo com o arquivo TRY para a cidade de Florianópolis, a temperatura externa máxima anual ocorre às 15h do dia 8 do mês de janeiro, e é de 36°C. Nesse horário, os valores de temperatura interna dos cômodos da residência estão abaixo do valor da temperatura externa, como pode ser observado através da Figura 27. Os dormitórios possuem temperaturas muito próximas entre si por possuírem, além da mesma orientação, volume de ar parecido. Durante o dia, a temperatura do banheiro é mais baixa do que a temperatura dos dormitórios, pois este possui apenas uma parede externa, ou seja, o ganho solar relativo é menor se comparado com o ganho solar dos dormitórios. Durante o período noturno, a situação é inversa, pois mesmo que o banheiro tenha um volume menor, a área de janela é menor e conseqüente a quantidade de frestas, o que reduz a infiltração e aumenta a temperatura. As temperaturas internas acompanham a curva da temperatura externa ao longo do dia, quando ocorre a ventilação. A partir das 16h ocorre uma queda de temperatura da ordem de 10°C, principalmente com a diminuição da radiação solar. Durante os períodos noturno e da madrugada, ocorre uma diferença significativa entre as temperaturas externa e internas, pois além do aumento da carga interna, a ausência de ventilação contribui para que as diferenças sejam maiores.

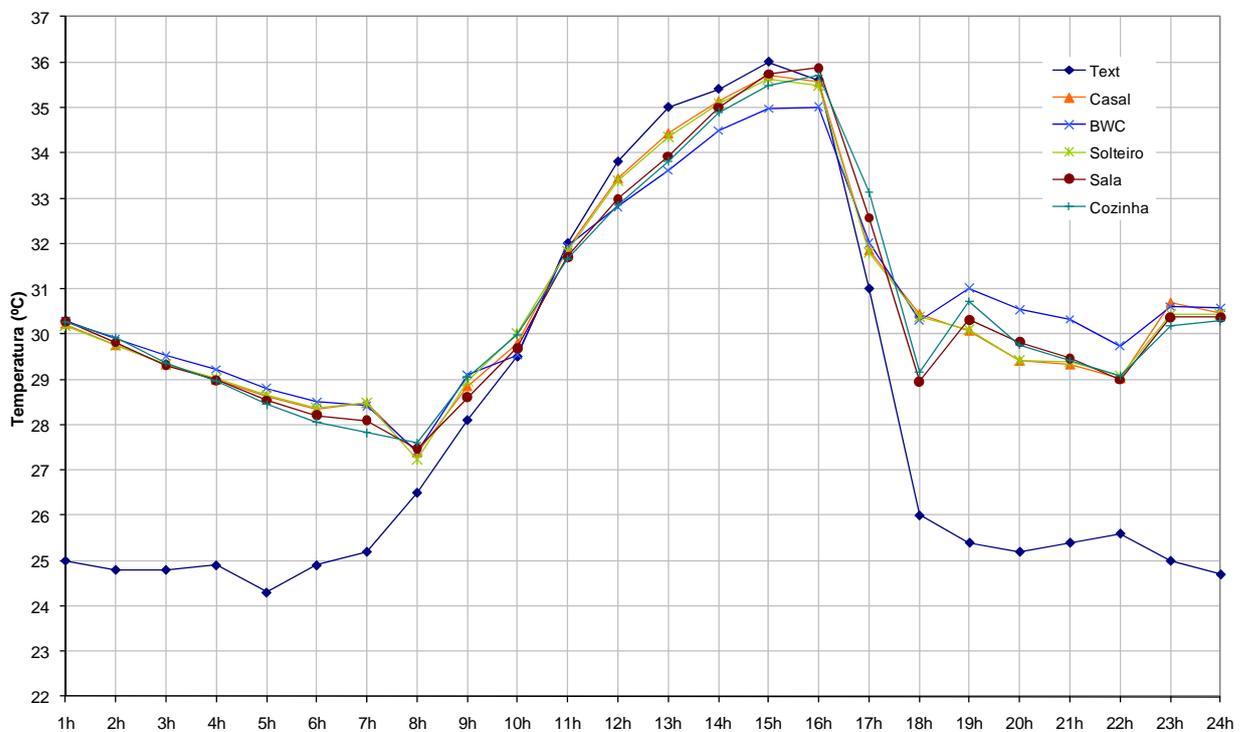


Figura 27 - Valores de temperatura horária do ar interno e externo para o dia 8 de janeiro.

Analisando-se os fluxos de calor da residência, através da Figura 28, para o dia de pico de temperatura externa, percebe-se que os maiores ganhos de calor são devidos à cobertura, que possui absorvância alta ($\alpha=80\%$) e à área envidraçada, que não possui sombreamento, composta pelas janelas leste e oeste. Devido à inércia térmica, o pico de ganho de calor através da cobertura ocorre às 16h (3.514W). Durante todo o período, o calor do interior da residência é dissipado através do piso, sendo que durante o dia a perda de calor é maior, culminando às 15h (3.561W), horário de temperatura de pico externa.

Os ambientes ganham calor devido à ventilação entre 11h e 16h. Nos outros horários, com a queda da temperatura externa do ar, o fluxo de calor se inverte. Porém, o ganho de calor é pequeno se comparado à perda. O valor máximo para o ganho de calor é de 196W às 13h e para a perda de calor é de 1.791W às 18h, após o acentuado decréscimo da temperatura externa.

As paredes externas contribuem com uma parcela menor no balanço térmico. Durante o dia, a residência está dissipando calor através dessas superfícies devido a coeficientes de convecção elevados. Durante a noite, quando as velocidades do vento e a temperatura externa são mais baixas, o fluxo de calor é revertido, ou seja, a residência passa a ganhar calor devido à massa térmica da edificação.

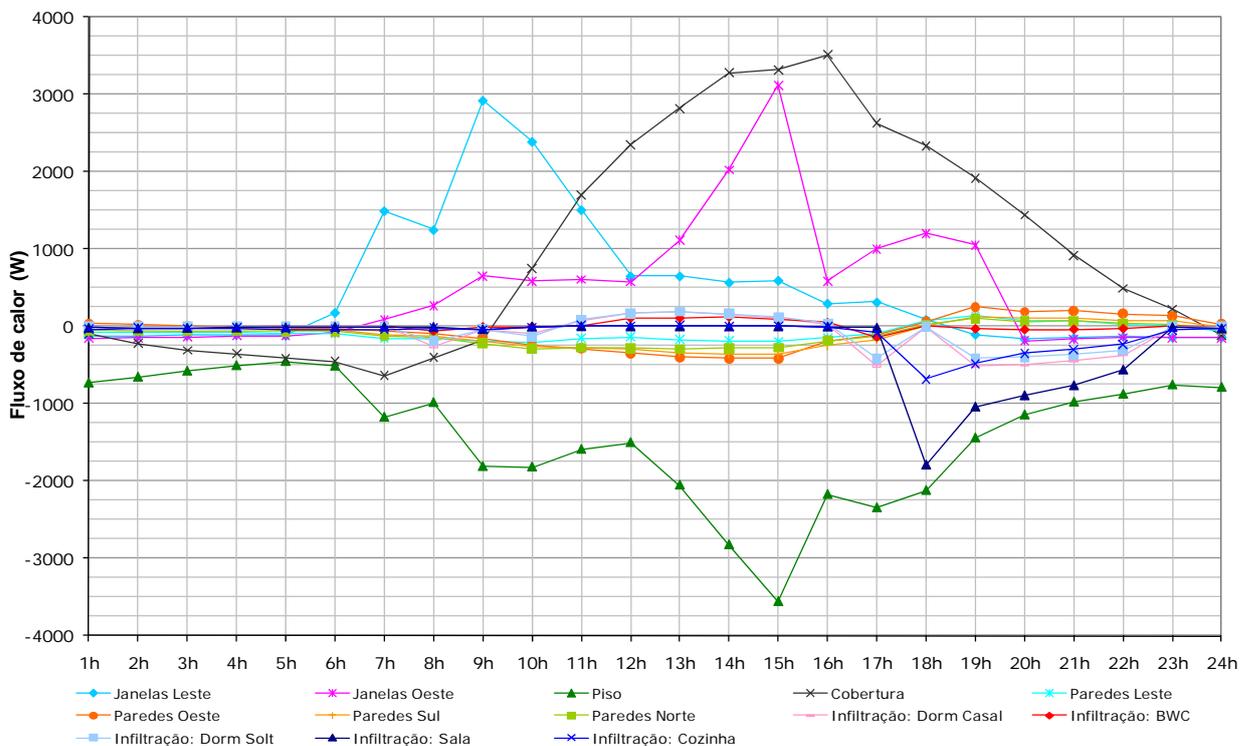


Figura 28 - Fluxo de calor horário para o dia 8 de janeiro.

O dia mais frio do ano de acordo com o arquivo climático da cidade de Florianópolis é 6 de agosto. Pode-se observar, através da Figura 29, que a temperatura mínima registrada é de 2°C às 8h. A temperatura máxima externa para esse dia ocorre às 16h, 14°C. Durante todo o período, a temperatura no interior da residência é superior à externa, com valores mínimos variando entre 12,6°C e 13,6°C, e máximos variando entre 17,3°C e 19,1°C. O ganho solar, as cargas internas e ausência de ventilação (presença de infiltração de ar) contribuem para que o envelope da edificação possua esse desempenho. Apesar de os valores de temperatura interna estarem abaixo do que seria confortável, esses se mantêm em média 8°C acima da temperatura externa, um resultado positivo frente à rigorosidade do clima para esse dia.

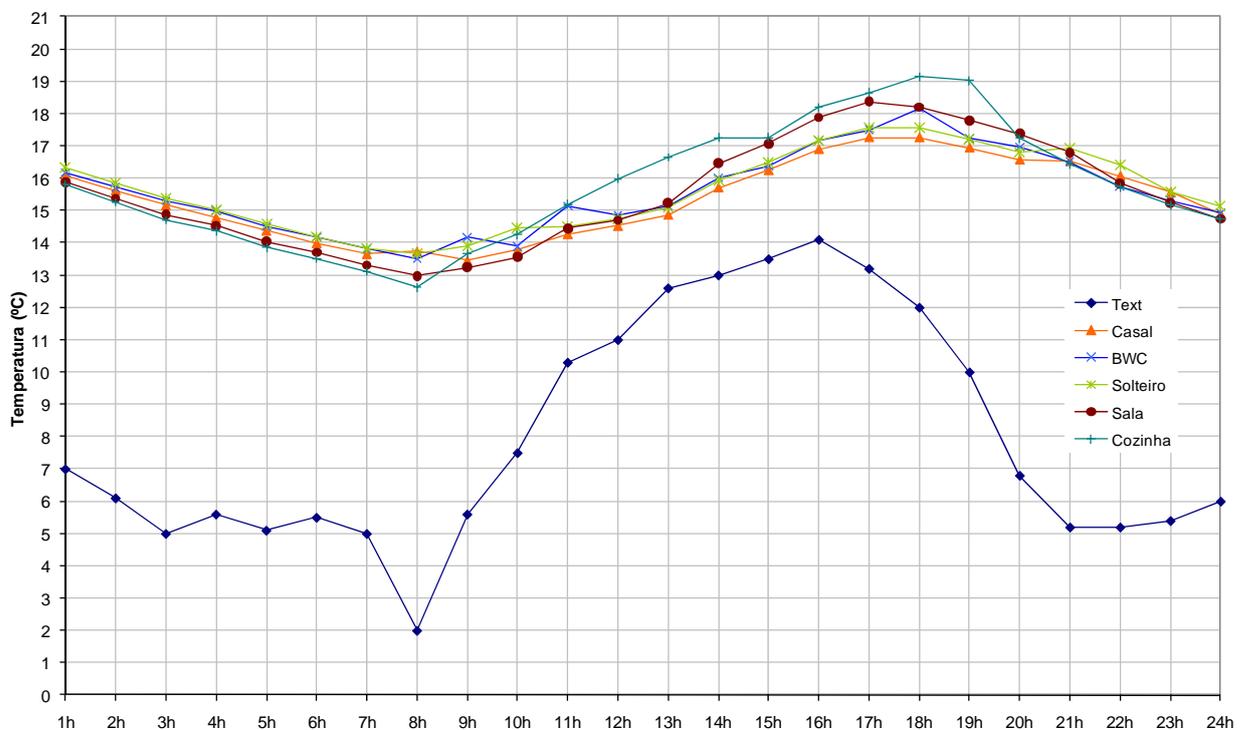


Figura 29 - Valores de temperatura horária do ar interno e externo para o dia 6 de agosto.

A Figura 30 apresenta os fluxos de calor através das superfícies do modelo para o dia 6 de agosto. Os maiores ganhos são devidos às superfícies envidraçadas, ao piso e à cobertura. As perdas de calor ocorreram principalmente através da cobertura, no período noturno, e pelo piso, durante o dia. Durante todo o período ocorre perda de calor através de infiltração do ar frio no interior dos cômodos. Porém, a perda é pequena, se comparada com a dissipação de calor para o dia de verão, 1.791W contra o pico de 93W do inverno. As maiores perdas de calor por infiltração ocorrem na cozinha e na sala, pois a direção predominante do vento para esse dia é oeste e sudoeste. As janelas da sala e da cozinha estão voltadas para o oeste, enquanto que a porta da sala possui orientação sul e a porta da cozinha possui orientação norte. O fluxo de calor

devido à infiltração é mais acentuado ainda na sala, porque além da orientação das aberturas estarem na direção do vento predominante, as dimensões da janela desse ambiente são superiores às dimensões da janela da cozinha, o que conseqüentemente aumenta a quantidade de frestas.

O fluxo de calor no piso é no sentido exterior-interior durante todo o período analisado com exceção do período da tarde, entre 14h e 17h. O pico de ganho de calor através do piso ocorre às 7h, 965W, e o valor máximo de perda de calor é 945W às 16h. A cobertura contribui para o aquecimento da residência durante à tarde e à noite, entre 12h e 20h. O ganho máximo de calor através da cobertura ocorre às 16h (1.131W) e a maior perda ocorre às 8h (1.279W).

Durante todo o período o calor interno é dissipado para o ambiente externo através da parede, pois a temperatura interna é maior do que a externa para esse dia. A perda de calor é mais acentuada durante o dia devido ao aumento da temperatura externa. Em média a dissipação de calor é de 182W, com picos que variam de 320W a 497W.

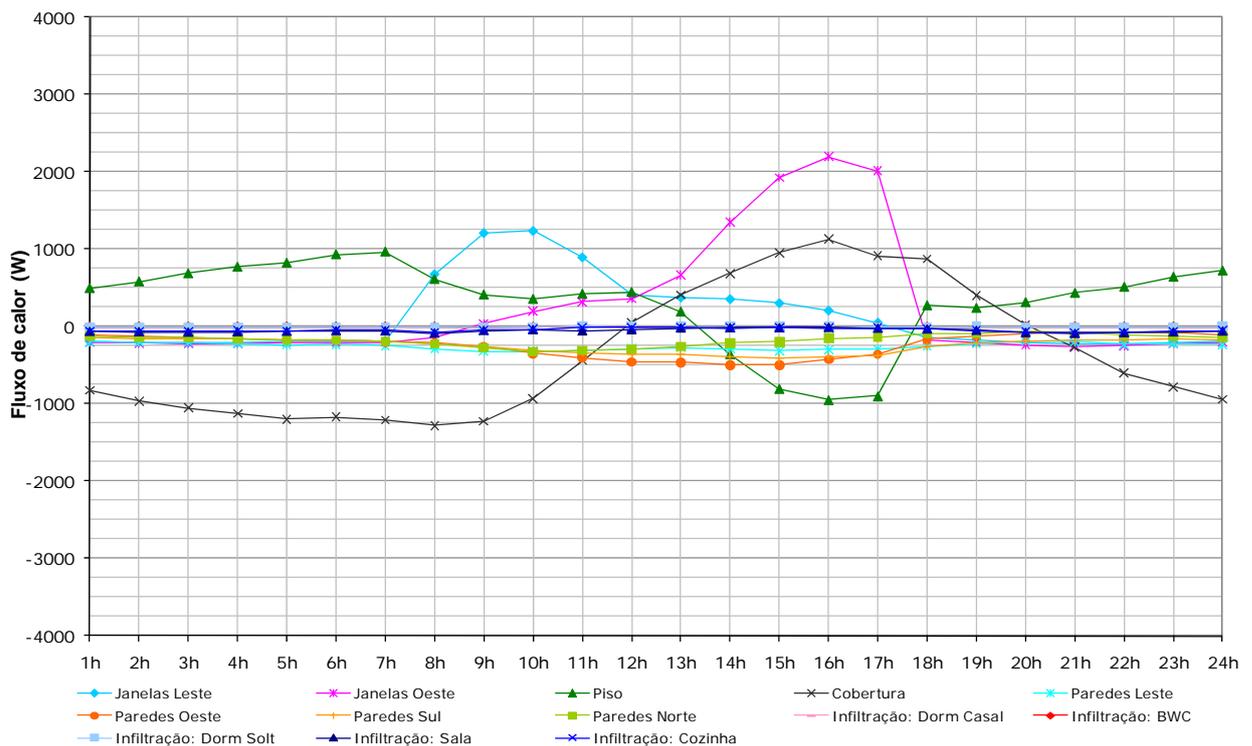


Figura 30 - Fluxo de calor horário para o dia 6 de agosto.

4.2.2 VENTILAÇÃO

A maioria das pessoas ocupa suas casas durante a noite e madrugada. Para esses períodos a velocidade dos ventos é menor do que as velocidades constatadas durante o dia, principalmente na parte da tarde. Na estação de verão as velocidades de vento que ocorrem com maior

freqüência variam de 2 a 4 m/s durante a noite e madrugada (Tabela 13). Na primavera, durante a maior parte do tempo não há registro de ventos durante a madrugada no arquivo TRY.

Tabela 13 – Velocidades do vento de maior freqüência de ocorrência por períodos do dia e estações do ano.

Período	Freqüência de ocorrência por faixa de velocidade			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Madrugada	39% 2 a 4 (m/s)	39% zero (m/s)	33% zero (m/s)	29% zero (m/s)
Manhã	32% 2 a 4 (m/s)	34% 2 a 4 (m/s)	31% 2 a 4 (m/s)	28% 2 a 4 (m/s)
Tarde	37% 4 a 6 (m/s)	40% 2 a 4 (m/s)	33% 2 a 4 (m/s)	34% 4 a 6 (m/s)
Noite	36% 2 a 4 (m/s)	30% zero (m/s)	30% 2 a 4 (m/s)	33% 2 a 4 (m/s)

A Tabela 14 apresenta a porcentagem de tempo na qual a velocidade do vento é nula de acordo com os períodos do dia e estações do ano. Durante todo o ano, a ausência de ventos é maior durante a madrugada, 29% do tempo para as estações de verão e primavera. A ausência de ventos é menor durante o período vespertino em qualquer uma das estações do ano.

Tabela 14 - Freqüência de não ocorrência de ventos.

Período	Períodos de ventos ausentes			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Madrugada	29%	39%	33%	29%
Manhã	19%	31%	25%	19%
Tarde	5%	6%	9%	6%
Noite	21%	30%	26%	18%

O tipo de ventilação adotado para o caso base foi ventilação diurna. Ela pode ocorrer no período compreendido entre 7h e 22h, período esse em que as janelas estão abertas. Para os outros horários, as trocas de ar podem ocorrer por infiltração, pois as janelas estão fechadas. Na Figura 31, são apresentados, hora a hora, os valores de renovações de ar para cada ambiente e a velocidade e direção do vento para o dia 8 de janeiro. Os valores de trocas de ar apresentados são referentes ao fluxo de ar externo que adentra pelas aberturas, não estão sendo apresentados os fluxos de ar entre os vários ambientes, apesar de terem sido computados.

Os valores de trocas de ar para os ambientes de orientação leste: dormitórios e banheiro seguem a tendência da curva de velocidade do vento, cuja predominância de direção é nordeste. A predominância de vento na direção nordeste é uma característica do período de verão. Os altos valores de trocas de ar – máximo de 48 trocas/h, 45 trocas/h e 37 trocas/h, para o quarto de solteiro, casal e banheiro respectivamente – observados nesses cômodos são devidos a velocidades de vento de até 8m/s.

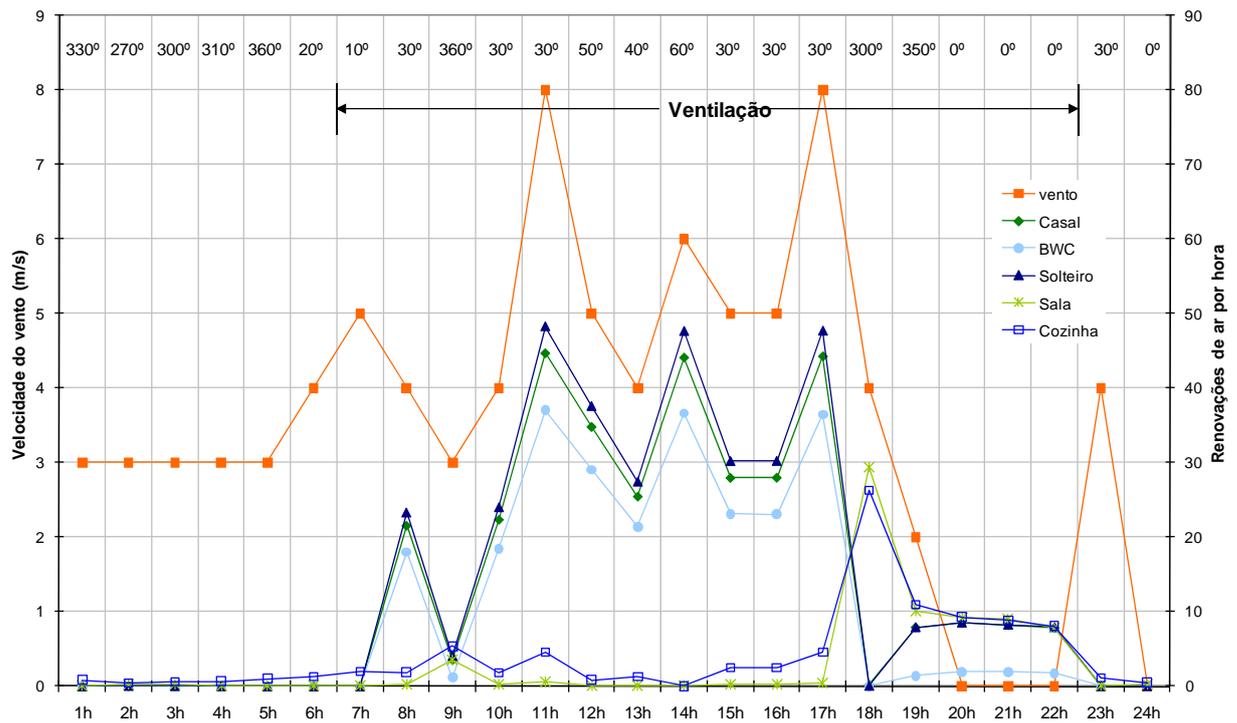


Figura 31 - Velocidade e direção do vento e trocas de ar por hora para o dia 8 de janeiro.

A taxa de ventilação na sala, cuja orientação da janela é oeste, é pequena durante o dia devido à direção predominante do vento (nordeste). Os maiores valores são verificados no início da noite, às 18h e às 19h, quando a direção do vento muda, e este se torna favorável à ventilação. Porém, a partir das 20h, o número de trocas de ar diminui novamente devido à ausência de ventos. Apesar disso, o movimento de ar é promovido pela diferença entre a densidade do ar no interior do ambiente e do ar externo. Nesse período, entre 20h e 22h, o número de trocas de ar para os ambientes varia entre 2 trocas/h (banheiro) e 9 trocas/h (sala e cozinha); nos dormitórios ocorreram 8 trocas/h.

Percebe-se que há um pequeno fluxo de ar no interior da residência durante os períodos em que as janelas permanecem fechadas, entre 23h e 7h. Esse fluxo ocorre devido à infiltração de ar através das frestas das portas e janelas. A cozinha e a sala possuem as maiores taxas de infiltração com relação aos outros cômodos da residência, pois durante o período que compreende o final da noite e a madrugada os ventos predominam na direção noroeste favorecendo o fluxo de ar para o interior da residência através das frestas das aberturas desses ambientes. A velocidade do vento foi de 3m/s na maior parte do tempo.

A Tabela 15 apresenta os valores máximos de taxa de ventilação para o dia 8 de janeiro, bem como a velocidade e direção do vento e a hora de ocorrência para os cômodos da residência.

O valor máximo de ventilação do dia é de 48 trocas de ar e ocorre às 11h, muito próximo dos valores para as 14h e 17h. Os picos da velocidade do vento ocorrem às 11h e às 17h. Porém, a combinação de velocidade e direção do vento para as 14h favoreceu a quantidade de trocas de ar, quando a velocidade do vento era de 6m/s e a direção de 60°. O mesmo comportamento é observado nos dormitórios e banheiro. Quando os valores de trocas de ar atingem o ápice, para os outros ambientes o valor é nulo ou muito reduzido. Os valores máximos de taxas de ventilação para a sala e a cozinha são de 29 e 26 trocas de ar por hora, respectivamente.

Tabela 15 – Valores máximos de ventilação para o dia 8 de janeiro.

Cômodo	Orientação (graus)		Trocas de ar/h	Horário (h)	Velocidade do vento (m/s)	Direção (graus)
	Janela	Porta				
Dormitório Casal	90	-	45	11	8	30
Dormitório Solteiro	90	-	48	11	8	30
Banheiro	90	-	37	11	8	30
Sala	270	180	29	18	4	300
Cozinha	270	0	26	18	4	300

Os valores máximos de infiltração de ar na residência podem ser observados na Tabela 16. Percebe-se que o volume de infiltração é pequeno nos dormitórios e banheiro. Às 2h se obtém as máximas taxas de infiltração para a maioria dos cômodos, porém os valores são muito próximos aos valores em outros horários. A cozinha é a única exceção. Nesse horário, a velocidade do vento é 3 m/s, a segunda maior registrada durante o período em que as janelas estão fechadas e a direção é de 270°. O pico de infiltração da sala ocorre às 2h quando a direção do vento é oeste e o pico de infiltração da cozinha ocorre às 6h quando a direção do vento é nordeste. A cozinha possui a janela na orientação oeste assim como a sala, porém a porta daquela é na orientação norte. Devido a isso, o horário no qual acontecem os picos de infiltração é diferente para os dois ambientes.

Tabela 16 – Valores máximos de infiltração para o dia 8 de janeiro.

Cômodo	Orientação (graus)		Trocas de ar/h	Horário (h)	Velocidade do vento (m/s)	Direção (graus)
	Janela	Porta				
Dormitório Casal	90	-	0,06	2	3	270
Dormitório Solteiro	90	-	0,07	2	3	270
Banheiro	90	-	0,10	2	3	270
Sala	270	180	0,23	2	3	270
Cozinha	270	0	1,31	6	4	20

As janelas, bem como as portas externas permanecem fechadas durante o inverno. Portanto fica claro que nesse período somente pode ocorrer infiltração de ar para o interior dos ambientes através das frestas das portas e janelas. A Tabela 17 apresenta as maiores taxas de infiltração para a residência no dia 6 de agosto. Os ambientes com as janelas voltadas para o leste obtiveram os valores máximos às 17h quando o vento soprava a uma velocidade de 3m/s, vindo do leste. A cozinha foi o ambiente com maior taxa de infiltração, 0,79 trocas de ar por hora, seguida pela sala com 0,61 trocas de ar por hora. As máximas taxas de infiltração para esses ambientes ocorreram às 21h e às 11h, respectivamente. Às 21h não há a presença de ventos, então a infiltração na cozinha deu-se através da diferença de densidade do ar interno e externo. A velocidade do vento era de 5m/s e a direção 210° às 21h, o que favorece a infiltração na sala por possui uma janela na fachada oeste e uma porta na fachada sul. O número de trocas de ar foi maior na cozinha, pois o volume desse ambiente é menor se comparado com a sala.

Tabela 17 - Valores máximos de infiltração para o dia 6 de agosto.

Cômodo	Orientação (graus)		Trocas de ar/h	Horário (h)	Velocidade do vento (m/s)	Direção (graus)
	Janela	Porta				
Dorm Casal	90	-	0,12	17	3	90
Dorm Solt	90	-	0,14	17	3	90
Banheiro	90	-	0,18	17	3	90
Sala	270	180	0,61	11	5	210
Cozinha	270	0	0,79	21	0	0

Na Figura 32, podem-se observar os valores de taxas de infiltração para as todas as horas do dia 6 de agosto. A velocidade do vento é nula a partir das 20h até às 3h. Durante esse período, as trocas de ar acontecem pela diferença de temperatura entre os ambientes e o exterior que chega a atingir mais de 11°C. Durante todo o período, os valores de taxa de infiltração estão abaixo de 1troca/h. Os ambientes com maior taxa de renovação de ar são a cozinha e a sala, por possuírem maior área de fresta (além de janelas, também possuem portas externas), e pela direção do vento ser favorável à infiltração de ar nesses ambientes em detrimento dos outros.

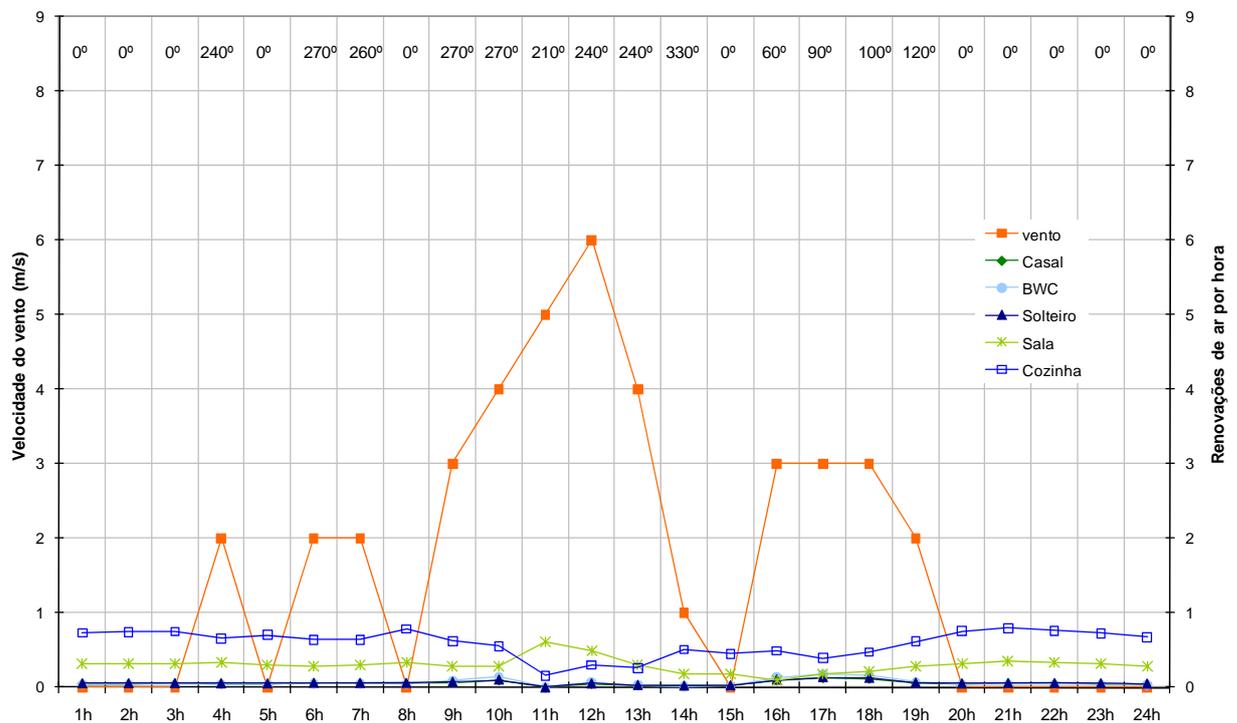


Figura 32 - Trocas de ar por hora e velocidade e direção do vento para o dia 6 de agosto.

O intervalo de taxa de infiltração e ventilação, durante o período de um ano, para o caso base, variou entre 0 e 50 trocas de ar por hora, como observado através da Figura 33, que apresenta a frequência de ocorrência de trocas de ar. Esse intervalo possui uma escala para os valores até 10 trocas de ar por hora e outra para os valores acima de 10 trocas de ar por hora. A maior frequência de ocorrência para o caso base é de até 1,0 trocas de ar por hora: para os dormitórios durante 66% do período e para o banheiro durante 71% do ano; para a sala a frequência de ocorrência é de 74% e 54% para a cozinha. O banheiro, de todos os ambientes, é o que possui a menor relação entre área de janela e área de piso. Dessa forma, a as baixas quantidades de trocas de ar, até 1,0 trocas, ocorrem com maior frequência para esse ambiente, se

comparado com os dormitórios, que possuem mesma orientação. Percebe-se que os valores de renovações de ar de até 10 são resultantes da infiltração e que acima disso são os valores provenientes da ventilação natural dos ambientes. Dessa forma, é possível concluir que durante o período de um ano, quando as janelas da residência estão fechadas, a quantidade de trocas de ar que mais ocorre é a de uma vez o volume do ambiente. E quando as janelas estão abertas, na maioria das vezes que houver a ventilação, esses valores serão de até 20 ou 30 trocas de ar por hora.

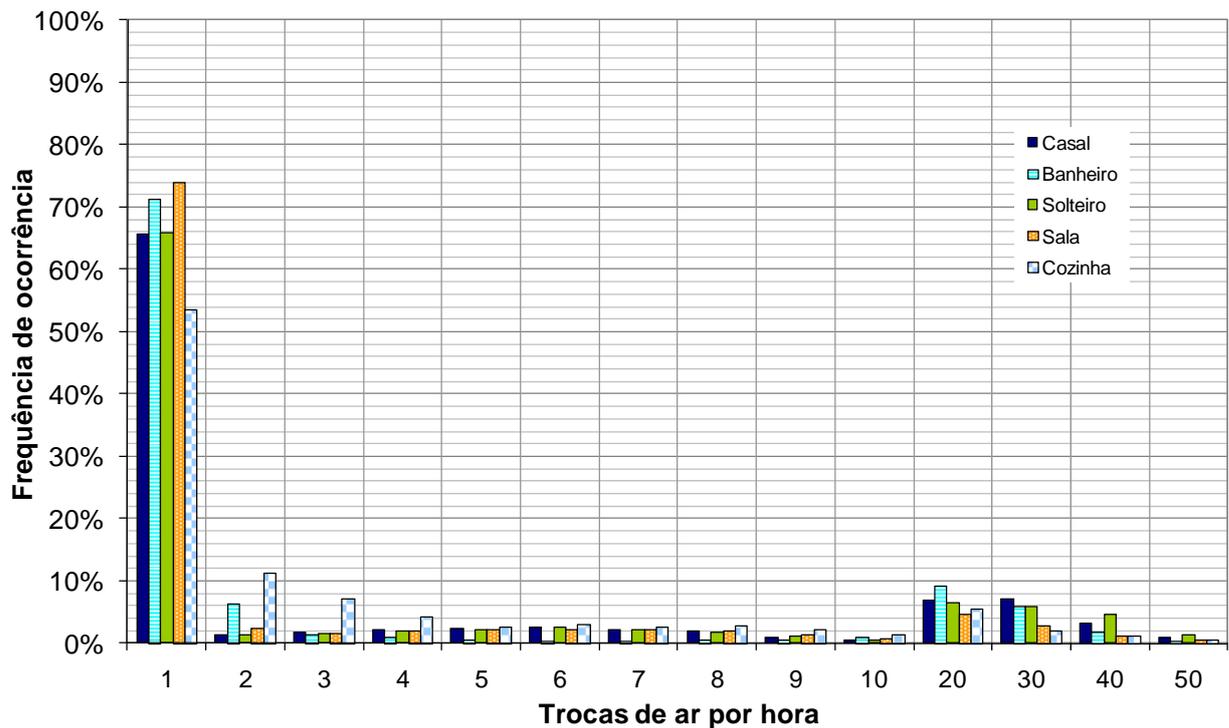


Figura 33 – Frequência de ocorrência de trocas de ar anual para o caso base.

4.3 SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS

A análise dos fluxos de calor para o caso base mostrou que os maiores ganhos na residência ocorrem através da cobertura e das janelas leste e oeste. Provavelmente a absorvância da cobertura seja responsável por esse comportamento, por possuir um alto valor, 80%. Com relação às janelas, estas não possuem sombreamento no caso base, medida essa que viria a diminuir o ganho de calor através destas superfícies. A influência dos valores desses parâmetros, além de outros relacionados à envoltória e ao tipo de ventilação, descritos na metodologia foi analisada através das simulações paramétricas. A seguir são apresentados os resultados de graus-

hora para a alteração da orientação do modelo, do tipo de cobertura e parede e ainda a análise da estratégia de ventilação.

4.3.1 ANÁLISE DA COBERTURA

Variando-se a absorvância da cobertura do caso base, percebe-se, através da Figura 34 que há uma relação linear entre os valores de graus-hora e de absorvância. O escurecimento da cor da cobertura faz com que as quantidades de graus-hora de inverno sejam menores. Para o verão, esse comportamento se inverte, e as coberturas mais claras apresentam melhor desempenho.

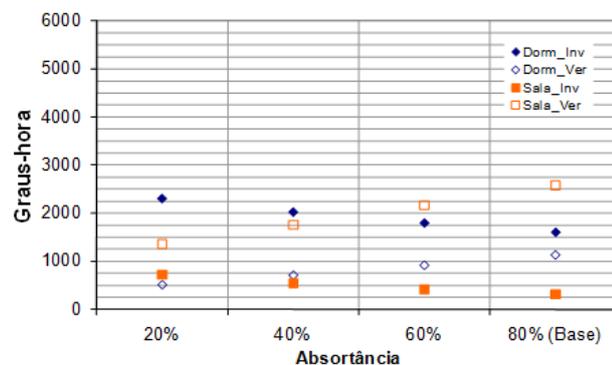


Figura 34 – Valores de graus-hora de inverno e verão para o dormitório e para a sala, variando a absorvância da cobertura do caso base.

Durante o inverno, a diferença entre as coberturas clara ($\alpha = 20\%$) e escura ($\alpha = 80\%$) é mais acentuada para o dormitório do que para a sala. Durante o dia, o principal ganho de calor ocorre através das janelas, que não possuem sombreamento. Por possuir ocupação predominantemente diurna, a sala é beneficiada por esse ganho, e o fluxo através da cobertura tem menos influência. O dormitório é ocupado durante o período noturno quando a diferença entre as temperaturas interna e externa é maior, e a edificação está dissipando calor através do envelope. A cobertura do caso base possui inércia térmica, portanto o ganho de calor durante o dia é dissipado durante parte da noite para o interior do dormitório. Na cobertura escura o fluxo de calor é maior. Portanto, resultou em menor quantidade de graus-hora para aquecimento.

Durante o verão, a residência ganha calor principalmente através da cobertura e das janelas, sem proteção solar. A influência da cor da cobertura, durante o verão, é maior na sala. Esse ambiente é ocupado durante à tarde e início da noite, horários nos quais o fluxo de calor através da cobertura ocorre no sentido exterior – interior. Portanto, o aumento da absorvância da cobertura é mais significativo para esse ambiente.

Geralmente, a cor da cobertura não varia ao longo do ano, bem como não varia de cômodo para cômodo. Portanto, a Figura 35 apresenta, além dos resultados anuais para cada cômodo, a soma da quantidade de graus-hora de desconforto para a sala e para o quarto. Percebe-se que as retas da sala e do dormitório são concorrentes. Enquanto o aumento da absorvância é favorável para o dormitório, onde predomina o desconforto por frio, o mesmo não acontece na sala, na qual predomina o desconforto por calor. A soma dos valores de graus-hora de desconforto da sala e do dormitório resulta em uma reta com inclinação similar à reta da sala. Ou seja, o desconforto por calor ainda é predominante, e as coberturas mais claras possuem desempenho melhor para a residência.

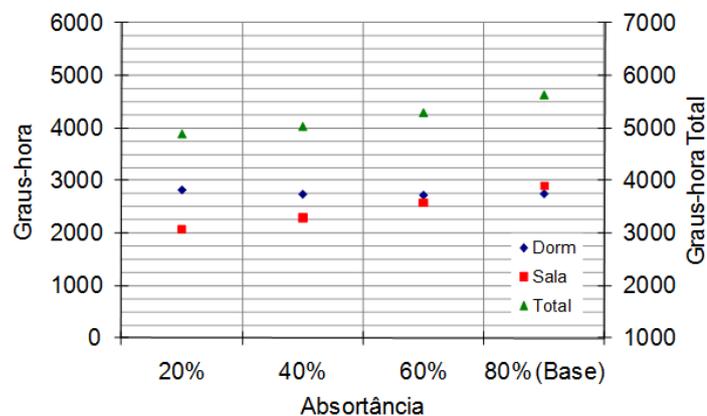


Figura 35 – Valores de graus-hora anual para o dormitório e para a sala, e valores de graus-hora total variando a absorvância da cobertura do caso base.

A Figura 36 apresenta os resultados das simulações para as coberturas com transmitância de $0,62\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, $1,18\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, $1,93\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ e $4,6\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ para o dormitório e para a sala, para os períodos de inverno e verão. Observa-se que a maior quantidade de graus-hora de desconforto é devido ao frio no dormitório e ao calor na sala. A variação na transmitância da cobertura não exerce influencia no desempenho térmico da sala durante o inverno. O pior resultado foi obtido com a cobertura de fibrocimento, para os dois ambientes, com exceção do período de verão para o dormitório, quando essa cobertura ajuda a dissipar o calor durante o período de ocupação, devido a baixa inércia térmica. Pode-se dizer, que de um modo geral, a cobertura de telha cerâmica, lã de vidro e forro de madeira apresentou o melhor desempenho para a residência como um todo, lembrando que se trata, nesse caso, de uma cobertura de absorvância de 80%.

Como o desempenho térmico da transmitância da cobertura está intimamente ligado à absorvância, são apresentados na Figura 37, os resultados anuais das simulações para as coberturas em função dos valores extremos de absorvância, 20% e 80%. Observa-se que, para o dormitório, a redução da absorvância da cobertura tem pouca influência, ou seja, somente para a

cobertura de maior transmitância térmica é que foi observado um aumento significativo de 642°h, pois o desconforto por frio é maior nesse cômodo. Para a sala, a variação da transmitância térmica das coberturas tem maior impacto quando esta é escura. Para a superfície clara, percebe-se que praticamente não há variação entre os resultados obtidos entre as três menores transmitâncias. A pior cobertura para os dois cômodos é a de fibrocimento. Nesse caso, a redução do valor da absorvância da cobertura da sala, proporcionou uma diminuição de 2.210°h, ou seja, uma redução de 47% na quantidade de graus-hora em relação ao caso com α de 80%.

Os valores de Graus-hora estão muito próximos entre si quando se trata da cobertura de telha cerâmica, lã de vidro e forro de madeira. Ou seja, para esse tipo de composição de telhado, a variação da cor não afeta o desempenho térmico da residência.

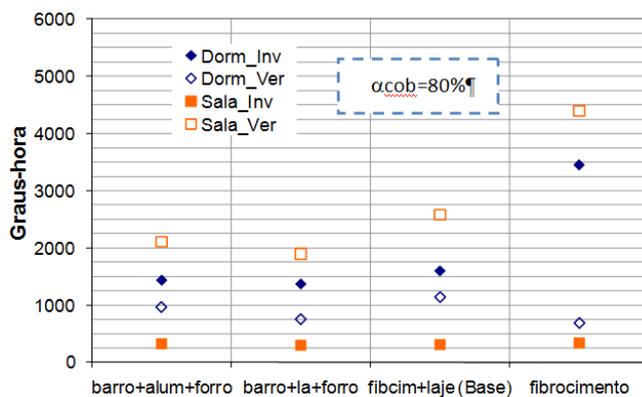


Figura 36 – Resultados por período e ambiente para diferentes transmitâncias de coberturas.

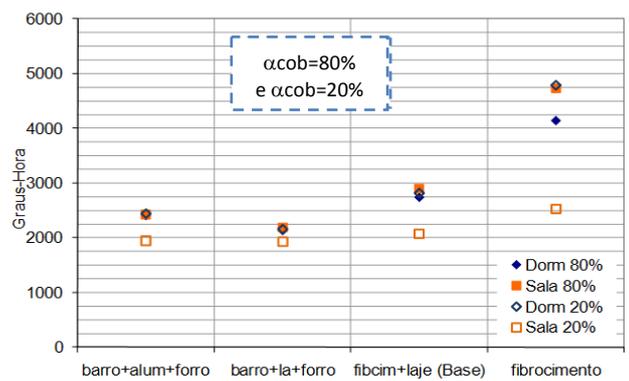


Figura 37 – Resultados anuais por ambiente para diferentes transmitâncias e absorvâncias de coberturas.

4.3.2 ANÁLISE DA ORIENTAÇÃO

A Figura 38 apresenta os valores de graus-hora para o período de verão e inverno para o dormitório e para a sala. Analisando-se a quantidade de graus-hora para o ano inteiro, somando-se as horas de desconforto de inverno e verão, percebe-se que a orientação do caso base (dormitórios voltados para o leste), apresenta o pior desempenho, somando 5.637°C.h, pois as superfícies envidraçadas da sala e da cozinha estão voltadas para a orientação oeste. A melhor orientação para a residência, dentre as simuladas, é aquela na qual as janelas dos dormitórios estão voltadas para o norte e da sala e da cozinha voltadas para o sul; a qual resulta em total de 4.940°C.h, 12,4% abaixo da quantidade de graus-hora para o caso base.

Observa-se que a quantidade de graus-hora de resfriamento é muito superior a quantidade de graus-hora de aquecimento para a sala para todas as orientações. Para o dormitório, ocorre o inverso, ou seja, qualquer que seja a orientação da residência, a quantidade de graus hora durante o inverno é superior a quantidade de graus-hora durante o verão.

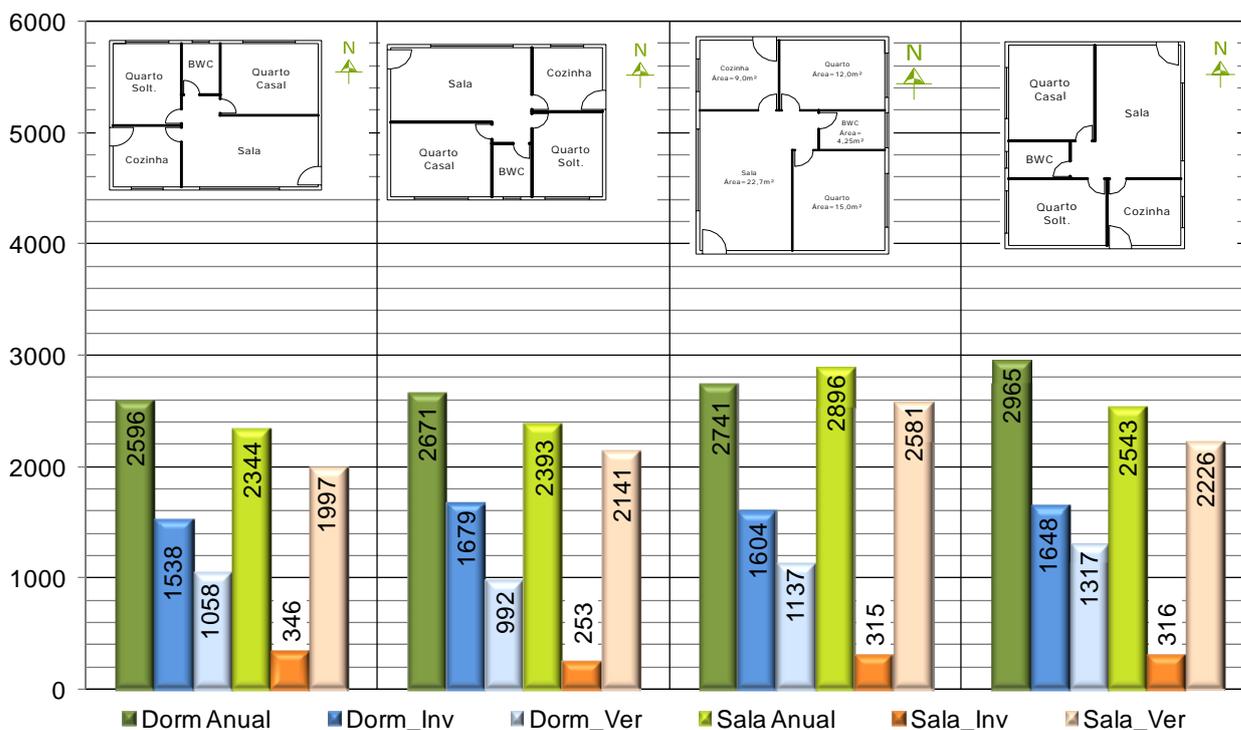


Figura 38 – Valores de graus-hora de inverno e verão para o dormitório e para a sala, variando a orientação do modelo.

4.3.3 ANÁLISE DA PAREDE

A Figura 39 apresenta os resultados para a simulação de diferentes valores de absorvância para as paredes do caso base. Há uma relação linear entre a quantidade de graus-hora e absorvância, da mesma forma que ocorreu com a variação da absorvância da cobertura. Na medida em que se aumenta o valor da absorvância das paredes, diminui-se a quantidade de graus-hora de aquecimento, enquanto que ocorre um acréscimo na quantidade de graus-hora de resfriamento. Dessa forma, a utilização de cores escuras nas paredes favorece o dormitório e a sala durante o inverno, quando absorve os ganhos solares e aumenta a temperatura das superfícies. Mas, piora o desempenho desses cômodos no verão.

Comparando-se os valores extremos de absorvância, aumento de 20% para 80%, obtém-se um acréscimo na quantidade de graus-hora de resfriamento de 34% para a sala e 62% para o dormitório. Por outro lado, obtém-se uma redução na quantidade de graus-hora de aquecimento

de 37% para o dormitório e 52% para a sala. Considerando-se que a cor da parede não vá mudar ao longo do ano, os resultados somados para os dois ambientes, dormitório e sala, são apresentados na Figura 40. Percebe-se que há uma pequena variação entre os valores de absorvância para o dormitório. Nesse caso, o aumento da absorvância da parede de 20% para 80%, contribui para um acréscimo de apenas 4,4% na quantidade de graus-hora total. Entretanto, utilizando-se da mesma comparação para a sala, ocorre um aumento de 25% na quantidade total de graus-hora. Se somados os valores de graus-hora dos dois cômodos, considerando-se o resultado para a residência como um todo, a influência da cor da parede quando compara-se os extremos é de 15%. Ou seja, para o caso em questão, quando se aumenta a absorvância das paredes de 20% para 80% o desempenho térmico é prejudicado.

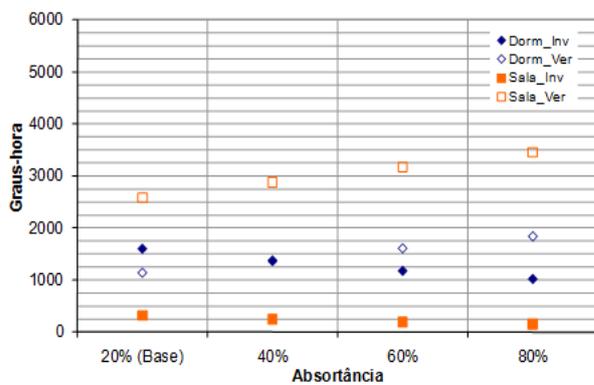


Figura 39 – Valores de graus-hora de inverno e verão para a sala e para o dormitório para diferentes absorvâncias de parede.

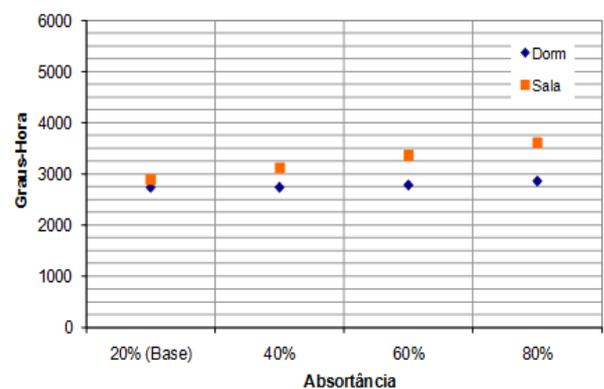


Figura 40 – Valores de graus-hora anual para a sala e para o dormitório para diferentes absorvâncias de parede.

O desempenho dos seis tipos de paredes: $0,25\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, $1,2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, $1,0\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, $1,8\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, $2,24\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ e $5,4\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, está representado na Figura 41. Todas as paredes possuem absorvância de 20%. O comportamento do desempenho térmico da sala variou pouco quando se compara a variação da transmitância térmica de um mesmo tipo de parede, leve ou pesada. Porém, os valores de graus-hora de resfriamento, para esse cômodo, relativo às paredes leves são superiores aos resultados obtidos com o emprego de paredes pesadas. A diferença entre o menor valor para as primeiras e as últimas é de $1.152^\circ\text{C}\cdot\text{h}$, ou seja, 32%. Com relação à quantidade de graus-hora de aquecimento, percebe-se que quanto maior a transmitância térmica da parede pesada, pior é o comportamento da sala. A diferença entre a parede de transmitância térmica de $1,0\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ e a parede de transmitância térmica de $5,4\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ é de $196^\circ\text{C}\cdot\text{h}$, ou seja, a quantidade de graus-hora aumentou 103%. Esse comportamento é explicado pelo fato de que, no inverno, a função da parede é impedir o fluxo de calor do interior para o exterior, então paredes com maior resistência térmica irão obter melhores resultados.

O desempenho térmico do dormitório foi o mesmo para os mesmos tipos de paredes, leve e pesada. Ou seja, o aumento da transmitância térmica gerou maior desconforto durante o inverno e menor desconforto durante o verão, pois durante o inverno é necessário impedir que o calor acumulado internamente seja dissipado para o ambiente externo, que possui temperaturas mais baixas do que as temperaturas internas. No verão ocorre o contrário, há uma necessidade de dissipação do calor interno, seja ele o ganho acumulado durante o dia ou a carga interna oriunda da ocupação. O melhor resultado para o inverno foi aquele obtido com a utilização da parede de transmitância térmica de $1,0\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Com relação ao caso base ($U=2,80\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), a redução na quantidade de graus-hora foi de 34%. O melhor resultado para os períodos quentes foi obtido com o uso da parede leve ($U=1,2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), 57% abaixo do valor obtido para o caso base.

A cidade de Florianópolis possui estações bem definidas, dessa forma, os componentes devem atender, da melhor maneira possível, a essas condições diversas. Por esse motivo, os resultados para o ano inteiro, somando-se os valores de graus-hora de aquecimento e resfriamento, são apresentados na Figura 42. Esses resultados refletem o comportamento do inverno para o dormitório e do verão para a sala. Quando as paredes possuem inércia térmica, os valores obtidos para a sala são muito próximos dos valores obtidos para o dormitório. Porém, para as paredes leves a diferença chega a ser da ordem de $1.500^\circ\text{C}\cdot\text{h}$. As paredes pesadas com menores valores de transmitâncias térmicas possuem o melhor desempenho para ambos os cômodos simultaneamente, configurando a melhor opção.

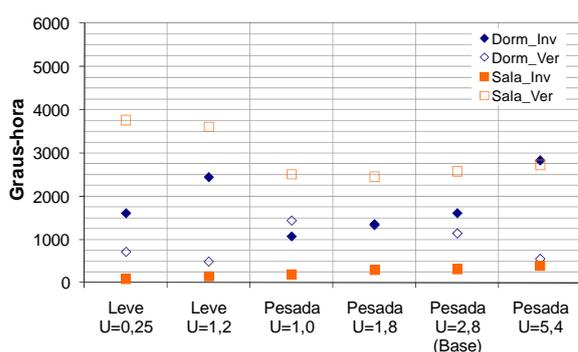


Figura 41 - Valores de graus-hora de inverno e verão para a sala e para o dormitório para diferentes transmitâncias de parede.

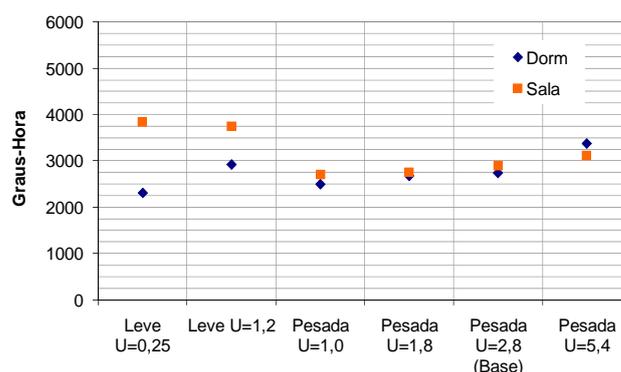


Figura 42 – Valores de graus-hora anual para a sala e para o dormitório para diferentes transmitâncias de parede.

4.3.4 ANÁLISE DA VENTILAÇÃO

A Figura 43 apresenta a quantidade de graus-hora de inverno e verão para áreas de abertura de 8%, 15%, 20% e 25%, com relação à área de piso. A Figura 43a apresenta os valores

para as aberturas sem sombreamento e a Figura 43b para as aberturas com sombreamento. O sombreamento das aberturas ocorre apenas no verão, dessa forma os valores de graus-hora de aquecimento são iguais nas duas figuras. As janelas permanecem fechadas durante o inverno, e o fluxo de ar ocorre através das frestas formadas ao redor das aberturas. O aumento da área de abertura gera aumento no comprimento de fresta dessas janelas. Portanto, durante o inverno, os valores de graus-hora para diferentes áreas de abertura variam pouco.

Analisando-se os resultados para as aberturas sem sombreamento, percebe-se que, para a sala, no verão, a área de 15% de abertura apresentou o melhor resultado, 2.358°C.h, contra 2.581°C.h do caso base, ou seja, redução de 9%. O aumento da área de abertura com relação à área de piso a partir de 15% resulta em um aumento da quantidade de graus-hora de resfriamento, 12% se comparado com a área de abertura de 25%. Com relação ao dormitório, percebe-se que há uma redução (14%) na quantidade de graus-hora de resfriamento com aumento da área de abertura de 8% para 15%. Porém, os valores de graus-hora de desconforto praticamente não variaram entre as áreas de abertura de 15%, 20% e 25%, provavelmente porque o resfriamento proporcionado por uma área de ventilação maior é anulado pelo ganho maior ganho solar.

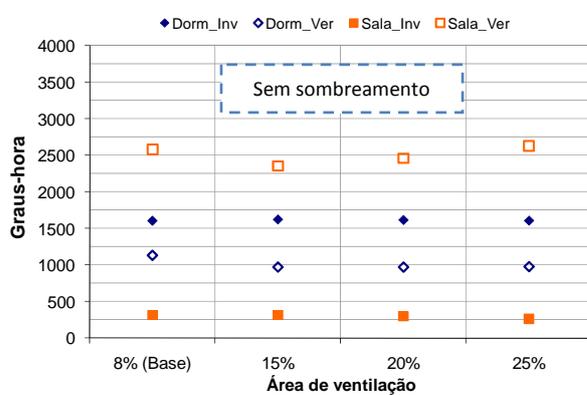


Figura 43a

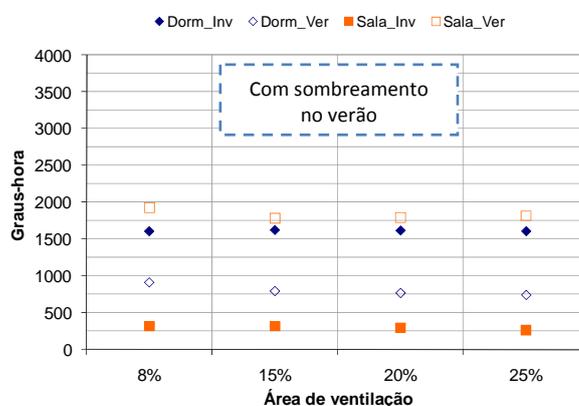


Figura 43b

Figura 43 – Valores de graus-hora em função da área de abertura para ventilação.

Quando as janelas são sombreadas, nos dois ambientes, sala e quarto, ocorre uma redução na quantidade de graus-hora devido ao aumento da área de abertura de 8% para 15%, porém para os outros valores de área de abertura a quantidade de graus-hora é praticamente mantida. Mesmo assim, apesar de insignificante, percebe-se que para o dormitório a redução continua com o aumento das áreas de abertura com relação à área de piso. Na sala, ocupação diurna, o aumento da área de ventilação, a partir de 15%, piora, mesmo que ligeiramente as condições do ambiente,

pois durante o dia, as temperaturas externas são mais elevadas do que as temperaturas internas, portanto, o aumento da área de ventilação contribui para que a temperatura interna se aproxime da externa. A ocupação do dormitório é noturna, e durante esse período o aumento da ventilação contribui para um melhor desempenho do ambiente, quando as temperaturas internas são superiores à externa.

Na Figura 44, que apresenta os valores de graus-hora anuais para o quarto e para a sala, observa-se que a utilização do sombreamento tem impacto maior no desempenho da sala. O sombreamento das aberturas contribui para uma redução média de 213°C.h para o dormitório e 678°C.h para a sala, onde a diferença máxima, 814°C.h, foi obtida entre as aberturas de 25%. Conclui-se que a área de ventilação mais adequada para o caso base, que possui ventilação diurna, é de 15% da área do piso. Se as aberturas fossem sombreadas, essa opção continuaria sendo a melhor, pois apesar de possuir valores semelhantes aos das aberturas de 20% e 25%, possui custo reduzido em comparação com aberturas maiores.

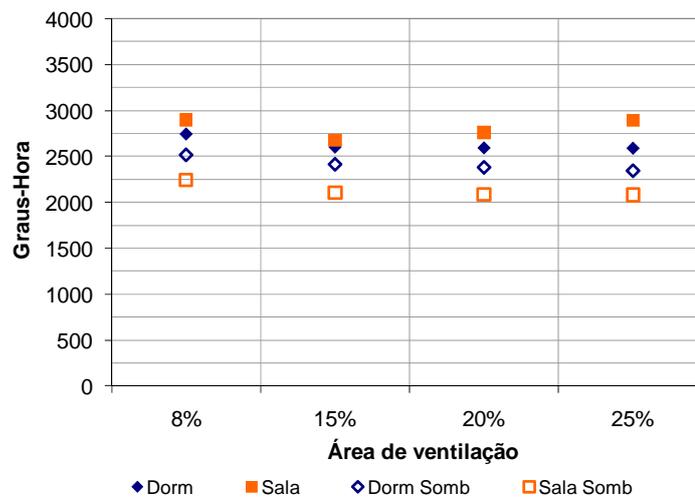


Figura 44 – Resultados anuais para a sala e para o dormitório em função da área de abertura e sombreamento.

Além da área de ventilação do caso base, foram analisadas diversas estratégias de ventilação em função de diferentes áreas de abertura e de sombreamento. A Figura 45 apresenta os resultados para as aberturas sem sombreamento para a sala (Figura 45a) e para o dormitório (Figura 45b). As diferentes áreas de aberturas comportaram-se da mesma maneira para as diferentes estratégias de ventilação. Novamente a área de abertura de 15% apresenta os melhores resultados para a sala e apresenta-se como a opção mais viável para o dormitório.

Para a sala, o pior desempenho foi obtido através da ventilação noturna e o melhor desempenho foi obtido com a estratégia de ventilação seletiva. A diferença média entre as duas estratégias foi de 926°C.h. As opções de ventilação diurna e diurna seletiva apresentam maior quantidade de graus-hora para o dormitório, enquanto que com a adoção das estratégias de ventilação noturna, noturna seletiva e seletiva obtiveram-se os melhores resultados. A diferença média obtida entre a ventilação diurna e a seletiva foi de 663°C.h. A semelhança entre os dados de ventilação diurna e ventilação diurna seletiva, presente nos dois ambientes, sugere duas hipóteses. A primeira é de que mesmo com a ventilação seletiva, as condições externas sejam favoráveis à abertura das janelas durante grande parte do período diurno. A segunda hipótese é que ocorra uma compensação dos valores de graus-hora ao longo do período analisado. No caso do dormitório, a semelhança entre as estratégias de ventilação noturna, noturna seletiva e seletiva, explica-se pelo fato de que se verifica ausência de ventos como situação predominante durante o verão, no período noturno, quando o cômodo está sendo ocupado.

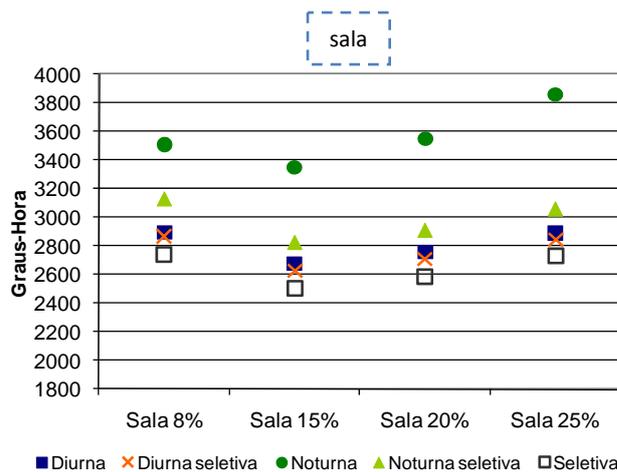


Figura 45a

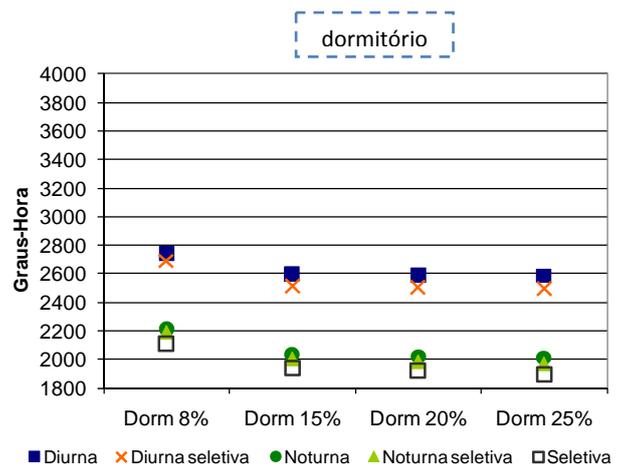


Figura 45b

Figura 45 - Resultados anuais para a sala e para o dormitório para diferentes estratégias de ventilação em função da área de abertura sem sombreamento.

A Figura 46 apresenta os resultados para as diferentes estratégias de ventilação quando as janelas estão sombreadas. Nesse caso, mais uma estratégia de ventilação é apresentada, e é denominada veneziana. Essa estratégia simula o fluxo de ar através de um dispositivo de sombreamento, como explicado na metodologia. A veneziana apresentou-se como a opção de pior desempenho para os dois ambientes, pois provavelmente a quantidade de infiltração de ar não foi suficiente para resfriar o ambiente em determinadas horas do ano, haja vista que para essa alternativa, as janelas são consideradas totalmente fechadas durante o outono e inverno e parcialmente fechadas (ventilação apenas através da veneziana) durante o restante do ano.

Depois da estratégia do uso de venezianas, a ventilação noturna continua sendo a pior opção para a sala (Figura 46a), mesmo quando essas são sombreadas e as diferenças obtidas entre as outras estratégias de ventilação são pequenas. Para o dormitório, Figura 46b, os segundos maiores valores de graus-hora foram obtidos com a ventilação diurna e diurna seletiva. A diferença média obtida entre a ventilação noturna e a ventilação seletiva para a sala foi de 524°C.h. A diferença média obtida entre a ventilação diurna e a ventilação seletiva para o quarto foi de 426°C.h.

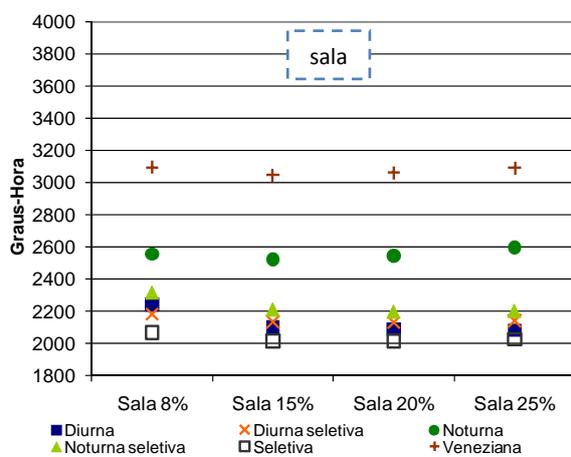


Figura 46a

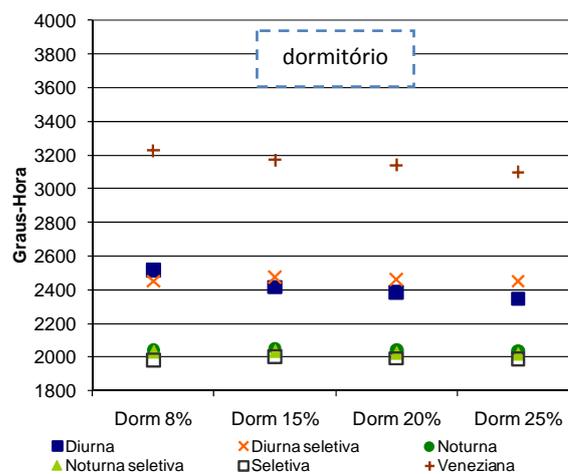


Figura 46b

Figura 46 – Resultados para o período de verão para a sala e para o dormitório para diferentes estratégias de ventilação em função da área de abertura com sombreamento.

Comparando-se os dados obtidos sem a utilização e com a utilização de sombreamento, percebe-se uma redução significativa na quantidade de graus-hora de desconforto por calor para a sala. Para o caso base, por exemplo, que possui área de ventilação de 8%, a quantidade de graus-hora foi reduzida em 25% para a sala quando se compara a estratégia seletiva e 27% comparando-se a estratégia noturna. Para o quarto, a redução foi de apenas 4% para o primeiro caso e 8% para a comparação com a estratégia diurna. Para a sala, quanto maior o tamanho da abertura, maior a redução na quantidade de graus-hora quando esta é sombreada. A redução na quantidade de graus-hora para o dormitório foi menos perceptível, pois o maior desconforto para esse ambiente é com relação ao frio.

4.4 CONSIDERAÇÕES

Este capítulo apresentou a análise do desempenho térmico da de uma residência unifamiliar através de simulação computacional no programa *EnergyPlus*, baseada nos requisitos da NBR 15220. Foi apresentada a análise dos fluxos de calor, temperaturas internas e trocas de

ar para o dia de pico de verão, 8 de janeiro, e para o dia de pico de inverno, 6 de agosto. Além disso, foram apresentados os valores de graus-hora para os períodos de aquecimento e resfriamentos para as estratégias propostas na metodologia.

Para o dia de pico de verão, observou-se que as temperaturas internas acompanham a curva da temperatura externa ao longo do dia, quando ocorre a ventilação. Porém, ocorre uma diferença significativa entre as temperaturas externa e internas durante os períodos noturno e da madrugada. A análise dos fluxos mostrou que os maiores ganhos de calor são devidos à cobertura, que possui absorvância alta ($\alpha=80\%$) e à área envidraçada, que não possui sombreamento. Durante todo o período, o calor do interior da residência é dissipado através do piso. Os ambientes ganham calor devido à ventilação entre 11h e 16h. Nos outros horários, o fluxo se inverte, porém, os ganhos são pequenos se comparados com as perdas. As paredes externas contribuem com uma parcela menor no balanço térmico. Os valores de trocas de ar para os ambientes de orientação leste seguiram a tendência da curva de velocidade do vento, predominantemente nordeste. A taxa de ventilação na sala é pequena durante o dia devido à direção predominante do vento. Percebeu-se que havia um fluxo de ar no interior da residência durante os períodos em que as janelas permaneceram fechadas, que ocorreu devido à infiltração de ar através das frestas das portas e janelas. A cozinha e a sala possuíram as maiores taxas de infiltração com relação aos outros cômodos da residência. O valor máximo de ventilação do dia foi de 48 trocas de ar e o valor máximo de infiltração foi 1,31 trocas de ar por hora.

No entanto, para o dia mais frio do ano, a temperatura mínima registrada foi de 2°C às 8h. Durante todo o período, a temperatura no interior da residência foi superior à externa. O ganho solar, as cargas internas e ausência de ventilação contribuem para que o envelope da edificação possua esse desempenho. Apesar de os valores de temperatura interna estarem abaixo do que seria confortável essas se mantêm em média 8°C acima da externa. Os maiores ganhos de calor foram devidos às superfícies envidraçadas, ao piso e à cobertura. As perdas de calor ocorreram principalmente através da cobertura, no período noturno, através do piso durante o dia e pela infiltração do ar frio no interior dos cômodos, sendo mais acentuado na sala e na cozinha. A infiltração de ar para o interior dos ambientes somente pode ocorrer através das frestas das portas e janelas durante o inverno. Durante os períodos em que a velocidade do vento é nula, as trocas de ar acontecem pela diferença de temperatura entre os ambientes e o exterior, que chega a atingir mais de 11°C. Os valores de taxa de infiltração ficaram abaixo de 1,0 trocas/h para o dia 6 de agosto. Os ambientes com maior taxa de renovação de ar são a cozinha e a sala, por

possuírem maior área de fresta (além de janelas, também possuem portas externas), e pela direção do vento ser favorável à infiltração de ar nesses ambientes em detrimento dos outros.

O intervalo de taxa de infiltração e ventilação, durante o período de um ano, para o caso base, variou entre 0 e 50 trocas de ar por hora. A maior frequência de ocorrência para o caso base foi de até 10 trocas de ar por hora. Dentro desse intervalo, o número de trocas de ar de maior ocorrência foi de até 1,0 trocas de ar por hora durante 66% do período para os dormitórios e durante 71% do ano para o banheiro; para a sala a frequência de ocorrência é de 74% e para a cozinha 54%.

Nas simulações paramétricas foram analisados os dados da sala e do dormitório de solteiro. Analisando-se a quantidade de graus-hora para o ano inteiro percebeu-se que a orientação do caso base (dormitórios voltados para o leste), apresentou o pior desempenho. A melhor orientação para a residência, dentre as simuladas, foi aquela na qual as janelas dos dormitórios estavam voltadas para o norte e as janelas da sala e da cozinha voltadas para o sul; resultando em uma quantidade de graus-hora 12,4% abaixo dos resultados para o caso base.

Durante o inverno, a diferença entre as coberturas clara ($\alpha = 20\%$) e escura ($\alpha = 80\%$) é mais acentuada para o dormitório do que para a sala e a influência da cor da cobertura, durante o verão, é maior na sala. Enquanto que o aumento da absorvância da cobertura é favorável para o dormitório, onde predomina o desconforto por frio, o mesmo não acontece na sala, na qual predomina o desconforto por calor. A soma dos valores de graus-hora de desconforto da sala e do dormitório mostrou que o desconforto por calor foi predominante na residência. Portanto, as coberturas mais claras possuem desempenho melhor para o caso base.

A variação na transmitância da cobertura não exerce influência no desempenho térmico da sala durante o inverno. O pior resultado foi obtido com a cobertura de fibrocimento, para os dois ambientes, com exceção do período de verão para o dormitório, quando essa cobertura ajuda a dissipar o calor durante o período de ocupação, devido à baixa inércia térmica. Pode-se dizer, que de um modo geral, a cobertura de telha cerâmica, lã de vidro e forro de madeira apresentou o melhor desempenho para a residência como um todo, lembrando que se trata, nesse caso, de uma cobertura de absorvância de 80%.

Os resultados anuais das simulações para as coberturas em função dos valores extremos de absorvância, 20% e 80%, mostraram que, para o dormitório, a redução da absorvância da cobertura exerceu pequena influência, ou seja, somente para a cobertura de maior transmitância

térmica é que foi observado um aumento significativo na quantidade de graus-hora. Para a sala, a variação da transmitância térmica das coberturas proporcionou maior impacto quando esta era escura. Para a superfície clara, percebeu-se que praticamente não houve variação entre os resultados obtidos para as três menores transmitâncias. A cobertura que resultou em pior desempenho para os dois cômodos foi a de fibrocimento. Nesse caso, a redução do valor da absorvância da cobertura da sala, proporcionou uma redução de 47% na quantidade de graus-hora em relação ao caso com α de 80%.

A utilização de cores escuras nas paredes favorece o desempenho térmico do dormitório e da sala durante o inverno, quando absorve os ganhos solares e aumenta a temperatura das superfícies. Mas, piora o desempenho desses cômodos no verão. Somando-se os resultados para os dois ambientes, constatou-se que o aumento da absorvância da parede de 20% para 80%, contribui para um acréscimo de 4,4% na quantidade de graus-hora total para o dormitório e 25% na quantidade total de graus-hora para a sala.

Através da análise do desempenho dos seis tipos de paredes, percebeu-se que os valores de graus-hora de resfriamento, para a sala, relativo às paredes leves são superiores aos resultados obtidos com o emprego de paredes pesadas. A diferença entre o menor valor para as primeiras e as últimas é de 32%. Com relação à quantidade de graus-hora de aquecimento, percebe-se que quanto maior a transmitância térmica da parede pesada, pior é o comportamento da sala. A diferença entre a parede de transmitância térmica de $1,0\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ e a parede de transmitância térmica de $5,4\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ é de 103%. O aumento da transmitância térmica das paredes do dormitório gerou maior desconforto durante o inverno e menor desconforto durante o verão. O melhor resultado para o inverno foi aquele obtido com a utilização da parede de transmitância térmica de $1,0\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Com relação ao caso base ($U=2,80\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), a redução na quantidade de graus-hora foi de 34%. O melhor resultado para os períodos quentes foi obtido com o uso da parede leve ($U=1,2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), 57% abaixo do valor obtido para o caso base. Os resultados anuais refletem o comportamento do inverno para o dormitório e do verão para a sala. Quando as paredes possuem inércia térmica, os valores obtidos para a sala são muito próximos dos valores obtidos para o dormitório. Porém, para as paredes leves a diferença chega a ser da ordem de $1.500^\circ\text{C}\cdot\text{h}$. As paredes pesadas com menores valores de transmitâncias térmicas possuem o melhor desempenho para ambos os cômodos simultaneamente, configurando a melhor opção.

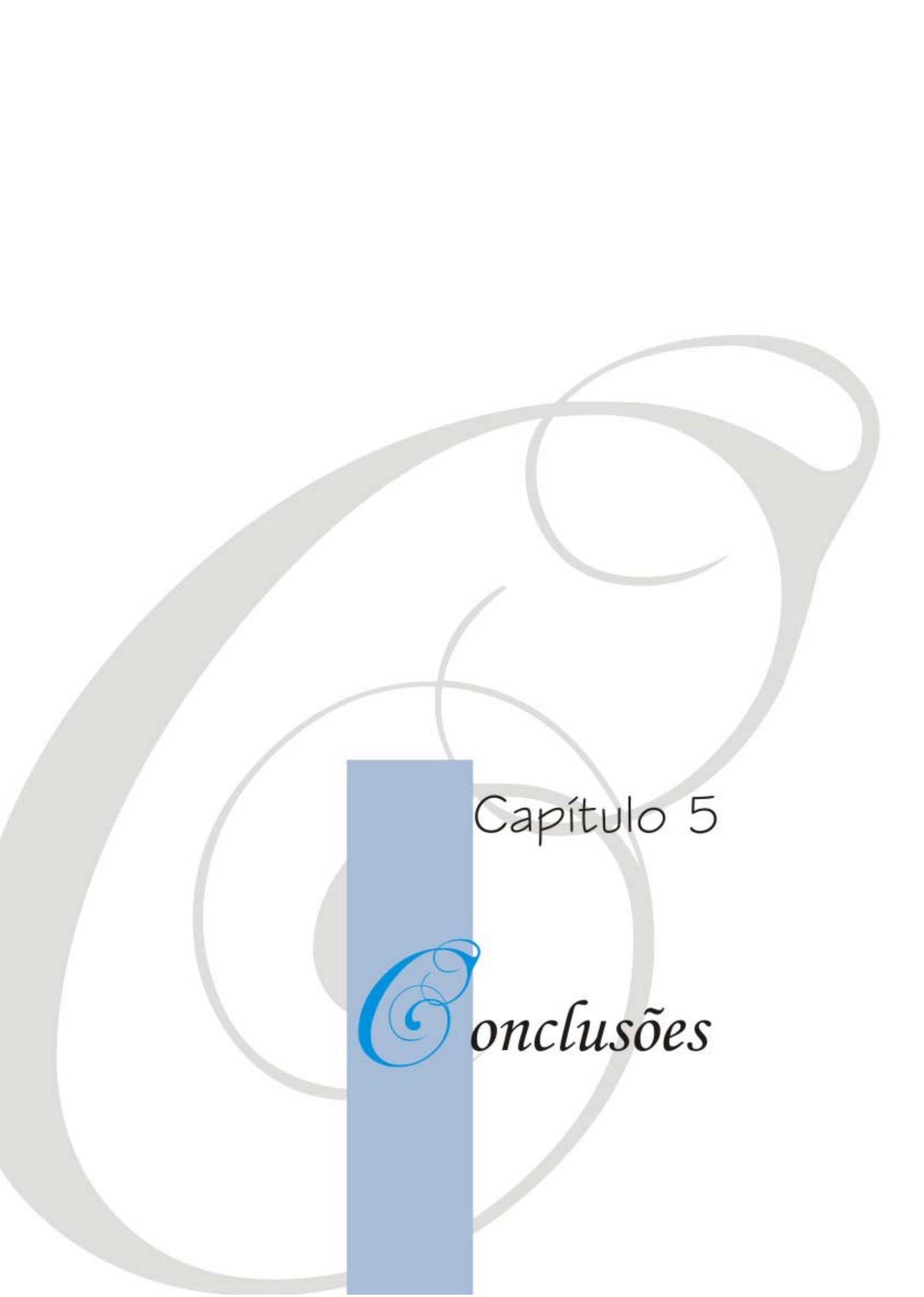
A análise dos resultados para diferentes áreas de abertura – 8%, 15%, 20% e 25% da área do piso, mostrou que, para as aberturas sem sombreamento, a área de 15% de janela apresentou o

melhor resultado para a sala no verão, redução de 9% com relação ao caso base. O aumento da área de abertura com relação à área de piso a partir de 15% resultou em um aumento da quantidade de graus-hora de resfriamento. Com relação ao dormitório, percebeu-se que houve uma redução (14%) na quantidade de graus-hora de resfriamento com aumento da área de abertura de 8% para 15%. Porém, os valores de graus-hora de desconforto praticamente não variaram entre as áreas de abertura de 15%, 20% e 25%. Com relação às janelas sombreadas, nos dois ambientes, sala e quarto, ocorre uma redução na quantidade de graus-hora devido ao aumento da área de abertura de 8% para 15%, porém para os outros valores de área de abertura a quantidade de graus-hora é praticamente mantida. Foi constatado através dos resultados de graus-hora anuais que a utilização do sombreamento proporcionou maior impacto no desempenho da sala. Conclui-se que a área de ventilação mais adequada para o caso base, que possui ventilação diurna, é de 15% da área do piso.

As diferentes áreas de aberturas, não sombreadas, comportaram-se da mesma maneira para as diferentes estratégias de ventilação. A área de abertura de 15% apresentou os melhores resultados para a sala e como a opção mais viável para o dormitório. Para a sala, o pior desempenho foi obtido através da ventilação noturna e o melhor desempenho foi obtido com a estratégia de ventilação seletiva. As opções de ventilação diurna e diurna seletiva apresentam maior quantidade de graus-hora para o dormitório, enquanto que com a adoção das estratégias de ventilação noturna, noturna seletiva e seletiva obtiveram-se os melhores resultados.

Depois da estratégia do uso de venezianas, a ventilação noturna foi a pior opção para a sala e os maiores valores de graus-hora para o dormitório foram obtidos com a ventilação diurna e diurna seletiva, quando as aberturas foram sombreadas. A veneziana apresentou-se como a opção de pior desempenho para os dois ambientes, pois provavelmente a quantidade de infiltração de ar não foi suficiente para resfriar os ambientes em determinadas horas do ano. As diferenças obtidas entre as outras estratégias de ventilação foram pequenas.

Comparando-se os dados obtidos sem a utilização e com a utilização de sombreamento, percebeu-se uma redução significativa na quantidade de graus-hora de desconforto por calor para a sala. A quantidade de graus-hora foi reduzida em 25% para a sala quando se compara a estratégia seletiva e 27% comparando-se a estratégia noturna para a área de ventilação de 8%. A redução na quantidade de graus-hora para o dormitório foi menos perceptível, pois o maior desconforto para esse ambiente é com relação ao frio.



Capítulo 5

Conclusões

Os objetivos definidos para esta pesquisa foram atendidos: as alterações no envelope da edificação foram simuladas, além das diferentes estratégias de abertura; as considerações com relação aos limites estabelecidos pela NBR 15220 foram realizadas e a modelagem da ventilação natural ocorreu através de pesquisa da literatura pertinente. Infelizmente, foi impossível a realização de medições para a calibração dos valores de ventilação e infiltração. Mesmo assim os resultados obtidos estavam dentro dos intervalos encontrados durante a pesquisa bibliográfica. O conhecimento adquirido ao longo do trabalho fornecerá informações importantes para outras simulações de edificações nas quais prevalece a ventilação natural, pois a simulação do fenômeno ainda é recente no país.

A realização da análise dos resultados deu-se através da quantidade de graus-hora de aquecimento e resfriamento. Utilizou-se como temperatura base, a temperatura operativa horária. Geralmente, a quantidade de graus-hora é função da temperatura do ar. Com relação à temperatura operativa, usa-se a frequência de ocorrência de temperaturas dentro de um limite. Porém, a análise de frequência de ocorrência desconsidera a amplitude das temperaturas. A utilização de graus-hora com relação à temperatura operativa procurou suprir essa carência.

Considerando-se os limites estabelecidos pela norma NBR 15220 e os resultados obtidos através das simulações, pode-se dizer que o intervalo determinado para a área de abertura visando à ventilação natural não é adequado para esse tipo de residência. Em muitos casos as áreas de abertura de 20% e 25% apresentaram resultados iguais ou piores à área de abertura de 15%. A estratégia de sombreamento das janelas durante o verão é uma alternativa eficaz para a redução das temperaturas internas durante esse período. A área mínima de abertura requerida para a ventilação natural no código de obras de Florianópolis é de 8% da área de piso. Essa condição resultou no pior desempenho para todas as orientações, mesmo sombreada.

Observou-se que a quantidade de graus-hora de resfriamento foi muito superior a quantidade de graus-hora de aquecimento para a sala e que para o dormitório, ocorreu o inverso, ou seja, a quantidade de graus hora durante o inverno foi superior a quantidade de graus-hora durante o verão.

Dentre as quatro paredes simuladas com capacidade térmica, duas delas possuem valores de atraso térmico superiores ao limite estabelecido pela norma. Os resultados das simulações mostraram que essa limitação não faz sentido, pois todas as paredes, com transmitância dentro dos limites da norma, apresentaram quantidades de graus-hora semelhantes. As paredes muito

leves apresentaram desempenho inferior ao das paredes simuladas com capacidade térmica, com transmitância limitada pela norma. A norma não possui limite inferior para a transmitância de paredes externas, porém nesses casos, a restrição a esse tipo de parede seria realizada pelo atraso térmico. A parede de concreto com 5cm de espessura, transmitância de $5,4\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ corresponde a um caso fora dos limites da norma, mas que representa uma prática construtiva nas habitações de baixa renda. Esse tipo de parede configura a pior hipótese de vedação para a residência.

O Fator de Calor Solar limita a transmitância e/ou cor das paredes e coberturas. A alteração da refletância das paredes externas, para a absorvância da cobertura de 80% e janelas sem sombreamento, não influenciou desempenho térmico do dormitório, porém, observou-se, através das simulações para a sala, aumento de 25% na quantidade de graus-hora com a mudança da absorvância de 20% para 80%. A NBR 15220 limita o valor da absorvância das paredes do caso base ($U=2,8\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) em 36% e em 56% para a parede com transmitância térmica de $1,8\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Essa limitação é benéfica para o desempenho térmico da residência. O FCS menor do que 6,5, estabelecido pela norma para coberturas, não limita a absorvância das coberturas simuladas. Apenas a cobertura de telha de fibrocimento, que possui transmitância superior, teve a absorvância limitada em 35%. Nas simulações observou-se que as coberturas escuras possuem desempenho muito inferior às coberturas claras. A limitação da absorvância constitui-se numa importante estratégia para a diminuição da quantidade de graus-hora para a residência.

O ponto mais crítico do estudo foi a escolha e modelagem da estratégia de ventilação natural de forma adequada, principalmente da veneziana. Como foram citadas anteriormente, muitas são as razões que levam os ocupantes a abrir ou fechar as janelas de suas casas. Ou seja, não há como prever a utilização das aberturas, mas deve-se garantir que as pessoas ocupem moradias que possibilitem a utilização de uma das estratégias e que proporcionem condições mínimas de conforto. Através dos resultados obtidos para as trocas de ar ocorridas no modelo durante o período de um ano, pôde-se concluir que quando as janelas da residência estavam fechadas, a quantidade de trocas de ar de maior ocorrência foi a de uma vez o volume do ambiente. E que quando as janelas estavam abertas, na maioria das vezes em que houve a ventilação, esses valores foram de até 20 ou 30 trocas de ar por hora.

O programa *EnergyPlus* fornece condições para a realização de simulações bem detalhadas. Isso acarreta em uma quantidade maior de variáveis que devem ser inseridas para a caracterização de um modelo específico. Se por um lado, a diversidade de dados de entrada,

transforma o programa numa ferramenta sem restrições; por outro, essa liberdade de modificação e escolha, pode gerar mais dúvidas e possivelmente levar a resultados errôneos.

Nas simulações térmicas semelhantes às desenvolvidas neste trabalho, a ventilação é considerada constante. Na análise de desempenho térmico apresentada, a ventilação natural foi simulada através de um algoritmo multizona integrado a um programa de simulação horária, o que fornece resultados mais precisos do que considerar taxas de ventilação constantes. Pois, além de não haver dados disponíveis sobre esses valores, a quantidade de trocas de ar varia extensamente ao longo do ano. A ferramenta computacional torna possível a utilização de rotinas geradas para a automatização do processo, permitindo a realização de inúmeras estratégias combinadas. Utilizando-se as mesmas rotinas, as alternativas poderão ser simuladas para climas de diferentes cidades do país.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A ventilação natural é de grande importância para a obtenção de conforto no setor residencial. Entretanto, existe a necessidade de medidas que aperfeiçoem o desempenho desse fenômeno. Algumas sugestões para a continuação deste trabalho são descritas abaixo:

- a) Realização de medições de ventilação e infiltração em residências;
- b) Investigação da modelagem de venezianas.
- c) Avaliação do custo de implantação de cada alternativa simulada;
- d) Formação de um banco de dados de valores de trocas de ar por hora em residências brasileiras;
- e) Incorporação de outros parâmetros de conforto na análise dos resultados, através da utilização combinada do programa *EnergyPlus* com um programa CFD.

REFERÊNCIAS

- AIR INFILTRATION AND VENTILATION CENTRE. **Technical Note 59 – Reshyvent project**. AIVC, 2005.
- ALLARD, F. (Ed.). **Natural ventilation in buildings: a design handbook**. London: James & James, 1998. 356 p.
- ASHRAE. 2001. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. USA, Atlanta. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers: 2001. cap 25.
- AYNSLEY, R. M. Natural ventilation model studies. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIND TUNNEL MODELING CRITERIA AND TECHNIQUES IN CIVIL ENGINEERING APPLICATIONS, 1982, Gaithersburg. **Proceedings...** Gaithersburg, 1982.
- AYNSLEY, R. M. Unresolved Issues in Natural Ventilation for Thermal Comfort In: INTERNATIONAL ONE DAY FORUM ON NATURAL AND HYBRID VENTILATION, 1., 1999, Sydney. **Technical Paper...** Sydney, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: desempenho térmico de edificações, parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.
- BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C.; BATISTA, J. O. A utilização de captadores de vento para aumentar a ventilação natural em espaços de sala de aula. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003. CD-ROM.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BSI 5925 Code of Practice for Design of Buildings. Ventilation principles and designing for natural ventilation**. British Standards Institution, London, 1991.
- CHAO C. Y.; WANA, M. P.; LAW B. A. K. **Ventilation performance measurement using constant concentration dosing strategy**. Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Hong Kong, 2004.
- CONCANNON, P. **Residential Ventilation**. Technical Note 57. Great Britain: AIVC, 2002.
- CLARKE, J. A. **Energy Simulation in Building Design**. Bristol: A. Hilger, 1985. 388 p.
- CRAWLEY, D. B. et al. EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**. 2001, v. 33, p. 319-331.
- DE GIDS, W.; PHAFF, H. **Ventilation rates and energy consumption due to open windows**. A brief overview of research in the Netherlands. Institute for Environmental Hygiene – TNO, Delft, Netherlands. 1982
-

DOE. **United States Department of Energy**. Disponível em: <<http://www.energy.gov/>>. Acesso em: outubro 2006.

ESRU. **Energy Systems Research Unit**. Disponível em: <<http://www.esru.strath.ac.uk/>> Acesso em: setembro 2005.

FEUSTEL, H. E. (ed.); RAYNOR-HOSEN, A. (ed) **Fundamentals of the Multizone Air Flow Model – COMIS**. Technical Note 29. Great Britain: AIVC, 1990.

FEUSTEL, H. E.; DIERIS, J. A survey of airflow models for multizone structures. **Energy and Buildings**, 18, p. 79-100, 1992.

FEUSTEL, H. E.; SMITH, B. V. **Comis 3.0 - User's Guide**. Berkeley, California, 1997.

FEUSTEL, H. E. COMIS: an international multizone air-flow and contaminant transport model. **Energy and Buildings**, 30, p.3–18, 1998.

GIVONI, B. Confort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**. 1992, v. 18, p. 11-23.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of building** . New York: Van Nostrand Reinhold, 1994. 263 p.

GEORGAKIS, C.; SANTAMOURIS, M. Canyons effects: Calculation of wind speed in an urban street canyon with the aid of a semi-empirical model based on experimental data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE “PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 1., 2005, Santorini. **Proceedings...** Santorini: Heliotopos Conferences, 2005. p. 117-124.

GOULART, S. V.G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. 2ª edição. Florianópolis. Núcleo de Pesquisa em Construção Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. 1998, 345p.

GRATIA, E et al. How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. **Building and Environment**. 2004, v. 39, p. 1157-1170.

GRINGS, E. T. O.; BEYER, P. O. Comparação entre resultados computacionais e experimentais do comportamento térmico de um ambiente. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2003. CD-ROM.

GROSSO, M.; MARINO, D.; PARISI, E. A wind pressure distribution calculation program for multizone airflow models. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 5., 1995, Madison, Wisconsin, USA. **Proceedings...** Madison, Wisconsin: Building Simulation, 1995. p. 105-118.

IPUF. Código de Obras da Cidade de Florianópolis – Santa Catarina Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis, 2000.

KOENE, F. G. H., BAKKER, E. J. Validated building simulation tool for ‘active façades’. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 9. 2005, Montréal, Canada. **Proceedings...** Montréal: Building Simulation, 2005. p. 541-548.

KOENE, F. G. H., SCHUIITEMA, R., HOUKEMA M. CFD calculations and measurements of night cooling by natural ventilation. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 9. 2005, Montréal, Canada. **Proceedings...** Montréal: Building Simulation, 2005. p. 541-548.

KOSMOS S. R., RISKOWSKI G. L., CHISTIANSO, L. L. Force and static pressure resulting from airflow through screens. 1993. Transactions of the ASAE, 36, 1467-1472.

LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Programa SOL-AR. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/software/analysisSOLAR.htm>>. Acesso em: setembro 2005.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2. ed. São Paulo, Ed. PW, 2004. 188 p.

LEITE, G. S.; HORST, H. **Desempenho térmico de edificações na região de Florianópolis**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2003. 77 p.

LIDDAMENT, M. W. (Ed). **Air infiltration calculation techniques - an applications guide**: catálogo de produtos. Great Britain: AIVC, 1986.

MASSIGNANI, R. F. **Comparação do desempenho térmico de dormitórios em diferentes orientações: estudo de caso de um edifício residencial em Florianópolis**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2004. 98 p.

MATOS, M.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Análise de área de abertura para ventilação na cidade de Florianópolis utilizando o programa COMIS/EnergyPlus. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió, 2005. CD-ROM.

MATOS, M.; WESTPHAL, F. S.; SCARDUELLI, F. A.; LAMBERTS, R. Análise do desempenho térmico de edificações residenciais através de simulação computacional no EnergyPlus baseada nos requisitos da norma NBR 15220. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2006. CD-ROM.

MME Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme>>. Acesso em: novembro 2004.

NIACHOU, K. et al. Comparative monitoring of natural, hybrid and mechanical ventilation systems in urban canyons. **Energy and Buildings**, 37, 2005. p.503-513.

NIST – NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation**. Gaithersburg, setembro, 2005.

PEDRINI, Aldomar. **Desenvolvimento de metodologia de calibração de modelos para simulação térmica e energética de edificações**. 1997. 186 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina , Florianópolis, SC.

PEIXOTO, L. K. O.; BITTENCOURT, L. S. Estudo da ventilação natural na UFAL através de simulação computacional. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2003. CD-ROM.

PEREIRA, F. O. R. Características da habitação de interesse social na região de Florianópolis: desenvolvimento de indicadores para melhoria do setor. São Paulo, SP. 1998. p.37-58. In: WORKSHOP AVALIAÇÃO PÓS-OCUPAÇÃO E DE DESEMPENHO, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1998. CD-ROM.

PNAD. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios: síntese de indicadores 2001**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Departamento de Empregos e Rendimento. Rio de Janeiro, 2002. 205p.

PROCEL. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**. Canal do consumidor. Consumo de Eletrodomésticos. Disponível em: <<http://www.eletronbras.gov.br/procel>>. Acesso em: outubro 2005.

ROULET, C. A.; FURBRINGER, J. M.; CRETTON, P. The influence of the user on the results of multizone air flow simulations with COMIS. **Energy and Buildings**, 30, 1999. p.73-86

SANTAMOURIS, M. **Prediction methods**. In: ALLARD, F. (Ed.). Natural ventilation in buildings: a design handbook . London: James & James, 1998. p. 63-158.

SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. (Ed.). **Passive cooling of buildings**. London: James & James, 1996. 472 p.

SANTAMOURIS, M.; DASCALAKI, E.; KLITSIKAS, N; GEROS, V. European Comission, Directorate General XVII for Energy Altener programme. **AIOLOS Project**, 1998.

SINPHA. **Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo**. Núcleo de Estatística Computacional, PUC/Rio. Rio de Janeiro, 1999. CD-ROM.

SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. Correlations for Pressure Distributions on Buildings and Calculation of Natural-Ventilation Airflow. **ASHRAE Transactions**, 1988. p. 243-266.

TAVARES, S. F. **Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

TNO BUILT ENVIRONMENT AND GEOSCIENCES. Programa para cálculo do coeficiente de pressão do vento. Disponível em: <<http://www.cpgen.bouw.tno.nl/cp/>>. Acesso em: março 2005.

TOLEDO, A. M.; PEREIRA, F. O. R. Visualização analógica da ventilação natural pela ação do vento em edifícios residenciais na mesa d'água. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2004. CD-ROM

TSANGRASSOULIS, A.; SANTAMOURIS, M.; ASSIMAKOPOULOS, D. "Theoretical and experimental analysis of daylight performance for various shading systems". **Energy and Buildings**, Vol. 24, pp. 223-230, 1996.

TSANGRASSOULIS, A.; SANTAMOURIS, M.; ASSIMAKOPOULOS, D. On the ventilation and daylight efficiency of various solar shading devices. In: AIVC Conference "Ventilation and Cooling", 18. 1997. Athens, Greece. **Proceedings...** Athens: AIVC, 1997. Volume 1, pp 225-234.

WALLAUER, M. D.; BEYER, P. O. Utilização do programa *EnergyPlus* para a simulação do conforto térmico em edificações populares em quatro capitais brasileiras In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2003. CD-ROM.

WALTON, G. N. **AIRNET – A Computer Program for Building Airflow Network Modeling**. NIST 89-4072, National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, Maryland, 1989.

WYCKMANS, A.; ASCHEHOUG, Ø.; HESTNES, A. G. Intelligent Building Envelopes - Application in the Field of Daylighting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY - EFFICIENT LIGHTING, 6, 2005. Shanghai. **Proceedings...** Shanghai: Right Light, 2005.

WOLFENSEHER, H. **Technical Note**. Air Infiltration and Ventilation Centre. AIVC, 1978.
