

Bianca Milani de Quadros

**VENTILAÇÃO NATURAL PARA O CONFORTO TÉRMICO E
RENOVAÇÃO DO AR EM AMBIENTES DE INTERNAÇÃO
HOSPITALAR**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Martin Ordenes Mizgier

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

De Quadros, Bianca Milani

Ventilação natural para o conforto térmico e renovação do ar em ambientes de internação hospitalar / Bianca Milani De Quadros ; orientador, Martin Ordenes Mizgier - Florianópolis, SC, 2016.

137 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Inclui referências

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Hospital. 3. Ventilação natural. 4. CFD. I. Mizgier, Martin Ordenes . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Bianca Milani de Quadros

**VENTILAÇÃO NATURAL PARA O CONFORTO TÉRMICO E
RENOVAÇÃO DO AR EM AMBIENTES DE INTERNAÇÃO
HOSPITALAR**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 30 de agosto de 2016.

Prof. Renato T. de Saboya, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Martin Ordenes Mizgier,
Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Roberto Lamberts, PhD.
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Fernando Simon
Westphal, Dr.
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Juliana Oliveira Batista,
Dr.
Universidade Federal de
Alagoas (Videoconferência)

À minha família, Sérgio, Margarida,
Pedro, Priscila e aos demais colegas,
amigos e familiares.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo à Deus, esta força maior, que me guia em todos os momentos da vida.

Aos meus pais por me ensinarem desde muito cedo a importância da dedicação aos estudos. Ao meu pai Sérgio, agradeço por iluminar meu caminho desde os primeiros passos e por me inspirar com seu amor pela vida acadêmica. À minha mãe Margarida, agradeço pelo seu carinho e exemplo profissional. Obrigada por me ensinar que por trás de cada projeto existe um processo de amadurecimento para se encontrar o desenho ideal.

Ao meu irmão Pedro, por continuar sendo o “mano maninho do meu coração”. Temos uma vida inteira pela frente para vibrarmos com vitórias como esta.

À Priscila, por me apresentar à uma vida de equilíbrio e leveza. Tua luz me transforma.

Ao professor Martin, pela sua orientação e postura como professor e amigo. Tuas indagações foram essenciais para a construção deste trabalho.

Aos demais professores, Feco, Lamberts e Westphal, pela dedicação à nossa universidade. Devemos o reconhecimento do LabCon e LabEEE ao trabalho intenso de pesquisa coordenado por vocês. Agradeço também a professora Juliana por suas contribuições como membro externo desde a qualificação deste trabalho.

Aos colegas e amigos que fiz nestes dois anos de mestrado, Marina, Bruno, Nati, Mateus, Natália, Rupp, Anjo Leti, Gabrielas, Ana, Maíra, Rapha, Veri, Américo, Luciana e Mônica. Obrigada pelas trocas, cafezinhos, happy hours e risadas que fizeram da nossa bolha um lugar mais divertido para trabalhar.

A CAPES, pelo apoio econômico que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais amigos e familiares, agradeço por torcerem pela conclusão de mais um sonho. A energia de vocês me motiva.

Obrigada a todos!

Lanço um convite urgente a renovar o diálogo sobre a maneira como estamos a construir o futuro do planeta. Precisamos de um debate que nos una a todos, porque o desafio ambiental, que vivemos, e as suas raízes humanas dizem respeito e têm impacto sobre todos nós. O movimento ecológico mundial já percorreu um longo e rico caminho, tendo gerado numerosas agregações de cidadãos que ajudaram na consciencialização. (Papa Francisco, Carta enc. *Sobre o Cuidado da Casa Comum*, 18 de junho de 2015)

RESUMO

Hospitais apresentam-se como grandes consumidores de energia, principalmente pelo sistema de ar condicionado. No entanto, estratégias passivas de condicionamento térmico se apresentam como possibilidade de aplicação em ambientes hospitalares onde não há obrigatoriedade na instalação de ar condicionado, como é o caso do setor de internação. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho da ventilação natural no conforto térmico e na renovação do ar em ambientes de internação hospitalar. O método utilizado compreende o estudo do comportamento da ventilação natural por meio de simulações CFD com o programa Phoenics. As tipologias simuladas possuem área construída de 26m² e área de janela equivalente à 1/6 da área total do ambiente com abertura de 50%, representando quartos de internação semi-privativos ocupados por dois pacientes e dois acompanhantes. Foram simulados quartos com diferentes estratégias de ventilação, sendo eles: quarto com ventilação unilateral simples, quartos com ventilação unilateral dupla (duas aberturas na mesma fachada) e quarto com ventilação cruzada. Para estes casos foram analisados o comportamento da ventilação natural, conforto térmico e renovação do ar em condições típicas de verão e meia estação em Florianópolis (SC). Com isso, identificou-se em um mesmo quarto de internação significativas variações nos valores de temperaturas operativas, velocidades do ar e fluxo de ar, observando diferenças importantes nas condições térmicas dos usuários de um mesmo ambiente. Os resultados revelam uma maior eficiência do vento norte (ângulo de incidência de 90°) em relação ao vento nordeste (ângulo de incidência 45°). Em situações de baixa disponibilidade de ventos (até 1,0m/s), o uso exclusivo da ventilação natural é insuficiente para garantir o conforto térmico em um dia típico de verão. Observou-se que, com o aumento da disponibilidade de ventos, os quartos que adotam as estratégias da ventilação unilateral dupla e ventilação cruzada parecem resultar em condições térmicas satisfatórias. A ventilação unilateral simples apresenta desempenho favorável apenas na meia estação, onde a temperatura do ar é considerada aceitável e não requer elevadas velocidades do ar. No âmbito da renovação do ar, o comparativo com as taxas recomendadas pelas normativas existentes, demonstraram que os quartos atendem a maioria das normativas. No entanto, o nível alto recomendado pela RE n°09 (ANVISA, 2003) dificulta seu atendimento em condições de ventos abaixo de 3,0 m/s. Os resultados desta pesquisa apontam um melhor desempenho das estratégias de ventilação unilateral dupla e ventilação

cruzada em comparação à ventilação unilateral simples, amplamente utilizada em quartos de internação. Frente a dificuldade de adotar a ventilação cruzada em ambientes hospitalares, a ventilação unilateral dupla parece ser uma alternativa eficiente para o conforto térmico e renovação do ar em quartos de internação.

Palavras Chave: Ventilação natural. Conforto térmico. Renovação do ar. CFD. Hospital.

ABSTRACT

Hospitals are large energy consumers especially by the HVAC system. However, passive strategies to achieve thermal comfort are possible to be applied in the areas where the HVAC system is not mandatory. The objective of this study is to evaluate the performance of natural ventilation in the thermal comfort and air renewal in patient rooms. The method comprises the study of the natural ventilation behavior through CFD simulations with Phoenics software. Typologies simulated have a floor area of 26m² and window area of 1/6 of the floor area (50% opening factor), that represents a semi-private patient rooms occupied by two patients and two visitors. Different ventilation strategies were simulated, which are: single-sided ventilation, double single-sided ventilation (with two openings in the same facade) and cross ventilation. For these cases were analyzed the behavior of natural ventilation, thermal comfort and air renewal in typical conditions of summer and mid-season in Florianópolis (Brazil). Thus, it was identified in the same patient room significant variations in the values of operative temperature, air speed and airflow rate, which makes appear important differences in the thermal conditions of the users of the same room. The results show a higher efficiency by north wind (angle of incidence 90°) in relation to northeast wind (angle of incidence 45°). In situations of low availability of winds (up to 1.0 m/s), the exclusive use of natural ventilation is insufficient to ensure thermal comfort on a typical summer day. It was observed that, when the wind availability was increased, the patient rooms that adopted the double single-sided ventilation and the cross ventilation appear to result in satisfactory thermal condition. The room that adopted simple single-sided ventilation presents favorable performance only in mid-station, where the air temperature is already acceptable and does not require high air speeds. In scope of air renewal, the patient rooms meet the airflow rates established by most of the standards. However, the high level recommended by RE n° 09 (ANVISA, 2003) makes difficult to be achieved when wind velocity is below than 3.0 m/s. The results of this research indicate a better performance of double single-sided ventilation and cross ventilation strategies compared to simple single-sided ventilation, widely used in patient rooms. Faced with the difficulty of adopting a cross-ventilation in hospital environments, the double single-sided ventilation seems to be an efficient alternative for thermal comfort and air renewal in patient rooms.

Keywords: Natural ventilation. Thermal comfort. Air renewal. CFD. Healthcare building.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico da evolução dos gastos diretos do Ministério da Saúde.	25
Figura 2. Enfermaria “Nightingale” do hospital Necker no início do século XIX, Paris, França.....	31
Figura 3. Hospitais da rede Sarah Kubitschek.....	32
Figura 4. Organização físico funcional do hospital.....	34
Figura 5. Tipologias de unidades de internação.....	35
Figura 6. Temperaturas de conforto observadas pelos pesquisadores e previstas pelos modelos de conforto para (a) ambientes condicionados artificialmente e (b) ambientes naturalmente ventilados.....	39
Figura 7. Relação de profundidade e altura em enfermarias com ventilação cruzada e ventilação unilateral, respectivamente.....	41
Figura 8. (a) Quarto sem shaft e (b) quarto com shaft.....	42
Figura 9. Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados para velocidade do ar de até 0,3m/s.....	44
Figura 10. Distribuição da pressão no ambiente interno e externo (a) causando fluxo de ar através de uma abertura inferior e uma superior (b) ou uma única abertura (c).....	57
Figura 11. Vetores de velocidade do ar previstos pela simulação CFD para ilustrar a anulação do efeito chaminé com o aumento da velocidade do ar externo.....	58
Figura 12. Ventilação cruzada.....	59
Figura 13. Ventilação unilateral.....	60
Figura 14. Efeito da diferença de pressão sobre a ventilação unilateral.....	60
Figura 15. Progressão das publicações com simulações CFD em edifícios (termos de busca “CFD AND building”).....	64
Figura 16. Desvios nos ventos causados por edificações mais altas em aglomerações urbanas.....	65
Figura 17. Resultados da simulação CFD para o quarto com abertura unilateral com saída pelo forro no verão.....	66
Figura 18. Mapa de concentração de bactérias no ar sobre o leito cirúrgico.....	68
Figura 19. Síntese das etapas do estudo.....	70
Figura 20. Temperaturas de bulbo seco média, mínima absoluta e máxima ao longo do ano.....	72

Figura 21. Histograma de frequência de ocorrência temperatura de bulbo seco no verão.....	73
Figura 22. Histograma de frequência de ocorrência temperatura de bulbo seco na meia estação.	73
Figura 23. Histograma de frequência de ocorrência dos ventos no verão, primavera e outono.....	74
Figura 24. Velocidades predominantes dos ventos no verão, primavera e outono.....	75
Figura 25. Velocidades predominantes dos ventos de acordo com a hora do dia.	75
Figura 26. TBS e velocidade do ar no dia 21 de janeiro.....	77
Figura 27. TBS e velocidade do ar no dia 05 de outubro.	77
Figura 28. Histograma de frequência de ocorrência dos ventos nos dias típicos dos períodos de verão e meia estação.	78
Figura 29. Layout padrão do quarto de internação adulto.	82
Figura 30. Quartos de internação investigados: quarto com ventilação unilateral simples (VU1), ventilação unilateral dupla (VU2) e ventilação cruzada (VC).	83
Figura 31. Parâmetros variáveis das simulações CFD.....	86
Figura 32. Definição do tamanho do domínio.	87
Figura 33. Gráficos de convergência	88
Figura 34. Geometria dos quartos.	90
Figura 35. Etapas do processamento de dados.	92
Figura 36. Localização dos pontos de análise.....	92
Figura 37 – Faixas de temperaturas operativas aceitáveis para espaços naturalmente ventilados. Linha tracejada indica as temperaturas médias predominantes calculadas para os dias típicos de verão e meia estação.	94
Figura 38 – Gráfico base para análise do conforto térmico em um dia típico de verão.	95
Figura 39 – Planta baixa com detalhe das áreas de turbulência.	98
Figura 40 – Comportamento da ventilação unilateral simples (VU1) com vento norte (à esq.) e nordeste (à dir.) a 3m/s.....	99
Figura 41 – Comportamento da ventilação unilateral dupla (VU2) com vento norte (à esq.) e nordeste (à dir.) a 3m/s.....	101
Figura 42 – Comportamento da ventilação cruzada (VC) com vento norte (à esq.) e nordeste (à dir.) a 3m/s.....	103

Figura 43 – Velocidade média do ar interno para os quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada) com vento norte e nordeste de 1 à 6m/s.	104
Figura 44 – Aumento percentual da velocidade média do ar interno em relação aos quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada) com vento norte e nordeste de 1 à 6m/s.	106
Figura 45 – Velocidade do ar sobre cada usuário para o quarto VU1 (ventilação unilateral simples) com velocidade do ar externo de 3m/s.	108
Figura 46 – Velocidade do ar sobre cada usuário para o quarto VU2 (ventilação unilateral dupla).....	109
Figura 47 – Velocidade do ar sobre cada usuário para o quarto VC (ventilação cruzada).	110
Figura 48 – Conforto adaptativo no verão com vento nordeste para os quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada).....	113
Figura 49 – Porcentagem de aceitabilidade do ambiente térmico no verão com os ventos predominantes norte e nordeste de 1 à 6m/s para os quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada).....	115
Figura 50 – Conforto adaptativo na meia estação com vento norte para os quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada).	117
Figura 51 – Porcentagem de aceitabilidade do ambiente térmico na meia estação com os ventos predominantes norte e nordeste de 1 à 6m/s para os quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada).	118
Figura 52 – Relação entre taxa de renovação, velocidade e direção do ar externo para a média dos três quartos de internação.....	120
Figura 53 – Taxa de renovação do ar com ventos norte de 1,0; 3,0 e 6,0m/s.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Aumento do limite da temperatura operativa (Δt_o) resultante de velocidades do ar acima de 0,3m/s.....	45
Tabela 2. Quadro comparativos para taxa de renovação do ar em quartos de internação hospitalar.....	55
Tabela 3. Condições de contorno.	78
Tabela 4. Tipologias arquitetônicas, tipos de quartos e estratégias de ventilação no setor de internação dos principais hospitais da grande Florianópolis (continua).	80
Tabela 5. Cálculo do fluxo fixo de calor.....	85
Tabela 6 – Recomendações para taxa mínima de renovação do ar.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ACH – Trocas de ar por hora (*air changes per hour*)
ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers*
CFD – Dinâmica dos fluídos computacional (*Computational Fluid Dynamic*)
EAS – Estabelecimentos Assistencias à Saúde
NPL – Nível de Pressão Neutra (*neutral pressure level*)
PMV – Voto Médio Predito (*Predicted Mean Vote*)
PPD – Percentagem Prevista de Insatisfeitos (*Predicted Percentage of Dissatisfied*)
PD – Percentagem de Pessoas Insatisfeitas pela corrente de ar (*Percentage Dissatisfied Due to Draught*)
SBS – Síndrome do Edifício Doente (*Sick Building Syndrome*)
SomaSUS – Sistema de Organização para Modelos Assistenciais do Sistema Único de Saúde.

SUMÁRIO

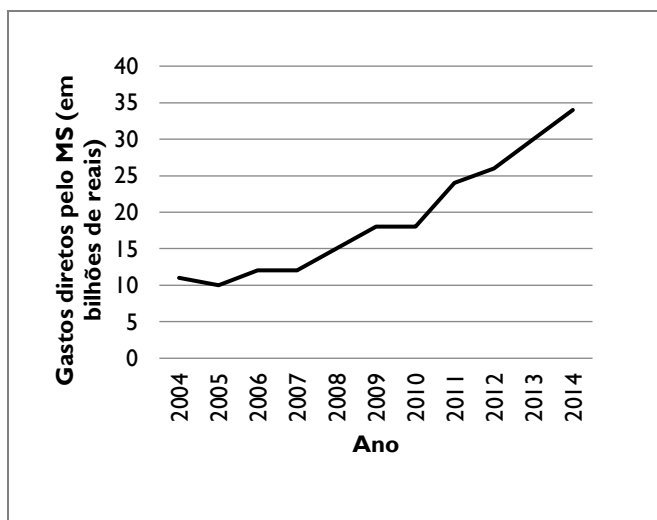
1.	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	OBJETIVOS	27
1.1.1.	Objetivo geral.....	27
1.1.2.	Objetivos específicos	27
1.2.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	27
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1.	ARQUITETURA HOSPITALAR	29
2.2.	VENTILAÇÃO NATURAL.....	36
2.2.1.	Ventilação natural para o conforto térmico.....	37
2.2.1.1.	Norma brasileira de conforto térmico	43
2.2.1.2.	Conforto térmico em hospitais	45
2.2.2.	Ventilação natural para a renovação do ar interno	48
2.2.2.1.	Renovação do ar em hospitais	50
2.3.	PRINCÍPIOS FÍSICOS DO MOVIMENTO DO AR	55
2.3.1.	Ação dos ventos	56
2.3.2.	Diferença de temperaturas.....	56
2.3.3.	Efeito conjunto	57
2.4.	TIPOS DE VENTILAÇÃO NATURAL.....	58
2.4.1.	Ventilação cruzada.....	58
2.4.2.	Ventilação unilateral.....	60
2.5.	MODELOS DE AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO	61
2.5.1.	Modelos empíricos	62
2.5.2.	Modelos zonais	62
2.5.3.	Modelo CFD (ComputationalFluidDynamic).....	62
2.5.3.1.	Avaliação do conforto térmico e renovação do ar por meio da simulação CFD	65
2.5.4.	Integração de modelos de análise térmica e da ventilação.....	68
2.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	68
3.	METODOLOGIA	70
3.1.	ETAPA 1: DEFINIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO.....	71
3.1.1.	Análise climática	71
3.1.2.	Definição das condições de contorno	76
3.1.3.	Caracterização dos ambientes de internação.....	79
3.1.4.	Determinação das cargas térmicas	83
3.1.5.	Casos de estudo	85
3.2.	ETAPA 2: MODELAGEM CFD	86
3.2.1.	Domínio e malha de avaliação.....	87
3.2.2.	Número de iterações	88
3.2.3.	Construção da geometria.....	89
3.3.	ETAPA 3: PROCESSAMENTO DOS DADOS	91
3.3.1.	Localização dos pontos de análise.....	92
3.3.2.	Crterios de avaliação do conforto térmico.....	93

3.3.3.	Critérios de avaliação da renovação do ar.....	95
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	97
4.1.	DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL	97
4.2.	CONFORTO TÉRMICO.....	110
4.2.1.	Verão.....	110
4.2.2.	Meia estação	115
4.3.	RENOVAÇÃO DO AR.....	119
4.3.1.	Influência da velocidade e direção do vento sobre a taxa de renovação do ar.....	119
4.3.2.	Comparativo com as taxas de renovação recomendadas pelas normativas.....	121
5.	CONCLUSÕES.....	123
5.1.	DIRETRIZES PARA PROJETOS DE AMBIENTES DE INTERNAÇÃO HOSPITALAR NATURALMENTE VENTILADOS.....	124
5.2.	LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	125
5.3.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	126
	REFERÊNCIAS.....	127
	ANEXO A.....	135

1.INTRODUÇÃO

A saúde é um dos destaques na política externa brasileira pela originalidade do seu sistema de saúde universal, integral e gratuito. Orientado por um conjunto de diretrizes válidas para todo o território nacional, o SUS parte da concepção ampla do direito à saúde e o papel do Estado na garantia deste direito. Após a criação do SUS, em 1986, o acesso aos serviços de saúde no Brasil melhoraram consideravelmente (PAIM et al., 2011). No entanto, o crescimento populacional e a modernização dos procedimentos médicos demandam constantes reajustes de investimentos neste setor. Em 10 anos, os recursos destinados ao setor da saúde mais que triplicaram no Brasil. Conforme indica o gráfico da Figura 1, houve um aumento dos gastos diretos do Ministério da Saúde de 10 bilhões em 2004 para 35 bilhões em 2014.

Figura 1. Gráfico da evolução dos gastos diretos do Ministério da Saúde.



Fonte: <http://transparencia.gov.br/>

O fortalecimento do SUS depende diretamente de investimentos para a reforma, ampliação e construção de novos hospitais no território brasileiro. Neste cenário, iniciaram-se as discussões sobre a revisão da RDC 50 (ANVISA, 2002)- Regulamento técnico para planejamento,

programação, elaboração e avaliação de projetos físicos de estabelecimentos assistenciais à saúde - principal normativa brasileira que serve como instrumento norteador para o projeto de estabelecimentos assistenciais à saúde.

Segundo Carvalho (2003), a RDC 50 (ANVISA, 2002) busca de maneira essencialmente funcionalista, assegurar a qualidade dos espaços, sem, no entanto, considerar as dimensões psicológicas do ambiente. Esta concepção essencialmente funcionalista resulta em hospitais tecnológicos que contrapõem o conceito do hospital terapêutico, onde a arquitetura não responde espacialmente às condições de conforto ambiental. Além da expansibilidade e flexibilidade espacial, o conforto ambiental torna-se um condicionante importante para a concepção de hospitais mais humanos (GÓES, 2004)

A qualidade dos ambientes e, em especial, o conforto térmico e a qualidade do ar interno interferem diretamente na saúde de seus usuários. No caso de edifícios hospitalares, estes aspectos influenciam principalmente aqueles pacientes que permanecem mais tempo internados, estimulando seu processo de cura (CARVALHO, 2003).

As discussões sobre o conforto dos usuários estão associadas à questão da eficiência energética das edificações. Lamberts et al. (2012) salientam que um edifício é considerado energeticamente mais eficiente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais de conforto ao seu usuário, com menor consumo de energia. Hospitais apresentam grandes áreas condicionadas artificialmente para preservar a qualidade dos medicamentos armazenados e manter estáveis as condições de conforto térmico do ambiente. O consumo de energia pelo sistema de ar condicionado pode representar 40% da demanda total de energia em um hospital de grande porte no Brasil (SZKLO et al., 2004).

No entanto, estratégias passivas de condicionamento térmico se apresentam como possibilidade de aplicação em ambientes hospitalares onde não há obrigatoriedade na instalação de ar condicionado. Segundo Lomas e Ji (2009), a ventilação natural em ambientes de internação geral e enfermarias é um solução interessante para a construção de novos edifícios hospitalares pautados sobre a ótica da eficiência energética.

Contudo, arquitetos e engenheiros devem ter conhecimento sobre os fundamentos básicos da ventilação natural para não comprometer o conforto térmico e qualidade do ar interno. Olgyay (1973) enfatiza que a ventilação natural deve trabalhar a favor e não contra as forças da natureza. A complexidade de análise do impacto do fluxo de ar sobre as condições ambientais torna o impacto da ventilação no conforto térmico

e na renovação do ar interno um campo aberto para pesquisas (SANTAMOURIS et al., 2006).

Entretanto, a literatura tem apresentado poucos estudos acerca da ventilação natural em ambientes hospitalares. Desta forma, a presente pesquisa tem como foco o conforto térmico e a renovação do ar em ambientes de internação hospitalar naturalmente ventilados e é norteada pelo problema de pesquisa: Ambientes de internação naturalmente ventilados localizados em Florianópolis proporcionam o conforto térmico e renovação do ar adequada para seus usuários?

1.1.OBJETIVOS

1.1.1.Objetivo geral

Avaliar o desempenho da ventilação natural no conforto térmico e na renovação do ar em ambientes de internação hospitalar por meio de simulações CFD.

1.1.2.Objetivos específicos

- Determinar os parâmetros de entrada e as condições de contorno para o modelo CFD a partir da análise climática do contexto de Florianópolis no verão e meia estação;
- Caracterizar os quartos de internação com base nas normativas e documentação técnica de projetos hospitalares existentes;
- Avaliar o conforto térmico adaptativo para cada usuário dos quartos de internação;
- Avaliar a renovação do ar nos diferentes quartos de internação.

1.2.ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho divide-se em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresentou uma introdução sobre o assunto, contextualizando o problema a ser explorado e os objetivos almejados.

O Capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica que serve de aporte teórico para a pesquisa desenvolvida. Inicia-se com um breve histórico sobre a arquitetura e as discussões atuais sobre a evolução dos edifícios hospitalares. Posteriormente, são apresentados os conceitos inerentes à

temática da ventilação natural, conforto térmico e qualidade do ar em ambientes hospitalares. Neste mesmo capítulo, também é apresentada a ferramenta de simulação utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

A metodologia da pesquisa é apresentada no Capítulo 3, a qual foi dividida em três etapas: definição dos casos de estudo, modelagem fluido computacional e processamento de dados. Na primeira etapa são apontados os dados de suporte para definição dos casos simulados. A segunda etapa envolve todos os aspectos do processo de simulação CFD. Na terceira etapa são elucidados os critérios adotados para a avaliação do conforto térmico e renovação do ar.

O capítulo 4 contempla o desenvolvimento do trabalho através dos resultados e discussões. Os primeiros resultados são referentes ao desempenho da ventilação natural nos quartos de internação, sendo discutidos os efeitos produzidos pelas diferentes direções dos ventos e configurações das aberturas. Na sequência são apresentados os resultados de conforto térmico e as condições de renovação do ar nos quartos de internação.

Por fim, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões da dissertação. Nessa etapa são expostas as conclusões pertinentes ao tema, identificando as limitações do trabalho e as sugestões para estudos futuros.

2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta o aporte teórico do trabalho que tem como principais assuntos: a arquitetura hospitalar, ventilação natural, conforto térmico e qualidade do ar interno. Esta revisão bibliográfica inicia com uma reflexão sobre a evolução da arquitetura hospitalar, sobretudo na mudança do hospital tecnocrático, preocupado em absorver os avanços tecnológicos, para o hospital terapêutico, voltado para o conforto de seus pacientes. São apresentadas as principais tipologias arquitetônicas das unidades de internação e as possíveis influências das diferentes configurações espaciais do quarto privativo e compartilhado sobre o conforto dos usuários.

Na segunda parte, a ventilação natural é introduzida e discutida como estratégia de conforto térmico e qualidade do ar. A discussão é aprofundada com a apresentação das especificidades a serem consideradas em edificações hospitalares.

Na terceira parte, são revisados os parâmetros de conforto térmico e renovação do ar para projetos de quartos de internação geral segundo as normativas brasileiras e internacionais. Ao final, a revisão aborda os princípios físicos da ventilação natural, os tipos de ventilação e os modelos de avaliação.

2.1.ARQUITETURA HOSPITALAR

A palavra hospital vem do latim *hospitalis*, adjetivo derivado de *hospes* que significa hóspede, estrangeiro, viajante e conviva. Também derivada do latim, a palavra paciente vem de *patientem* que significa que tem paciência, que sabe esperar, sereno e conformado. Nas suas origens, os hospitais eram locais aonde os pacientes iam para morrer com um mínimo de dignidade (GÓES, 2004). A estrutura do hospital tinha a função de segregar e excluir os enfermos, loucos, devassos e prostitutas da sociedade para minimizar riscos de epidemias e prestar assistência social. Somente a partir do século XVIII, surge a noção do hospital como local de cura pela prática da medicina (TOLEDO, 2006)

Esta mudança de conceito fez emergir questionamentos sobre os procedimentos médicos e as edificações onde estas atividades são praticadas com o foco na pesquisa sobre a tipologia dos hospitais (FOUCAULT, 1979; MIQUELIN, 1992; TOLEDO, 2006). Segundo Miquelin (1992), a análise comparativa entre as tipologias dos edifícios

hospitalares se mostra como uma ferramenta importante para a evolução do processo projetual.

(...) o conhecimento sobre arquitetura hospitalar está mais nos edifícios e projetos/produtos do design do que no processo de design propriamente dito; estudar e avaliar comparativamente as morfologias dos edifícios é a melhor forma de obter respostas sobre o que são, como funcionam, quanto custam e como os edifícios hospitalares podem ser cada vez melhores e belos para todos os seus usuários. (MIQUELIN, 1992, p. 24).

No início do século XIX, a enfermeira britânica Florence Nightingale questionava a teoria dos miasmas em suas pesquisas sobre hospitais. Segundo a teoria, as doenças teriam origem nos miasmas, sendo estes gases resultantes da decomposição da matéria orgânica. Esta teoria é derrubada pela teoria microbiana que sustenta que os microrganismos são a causa de inúmeras doenças. Florence Nightingale sugeria que os problemas dos hospitais consistiam na falta de padrões adequados de iluminação e ventilação natural, áreas mínimas por leito e superlotação de pacientes (MIQUELIN, 1992).

A partir de suas observações surge a morfologia pavilhonar que dividia as funções de internação, cirurgia e diagnósticos, consultórios para atendimento ambulatorial, administração e serviços de apoio. Este novo modelo adotava como partido a enfermaria aberta, denominada enfermaria “Nightingale”, com exemplares em funcionamento até hoje como o hospital Necker ilustrado pela Figura 2.

(...) um salão longo e estreito com leitos dispostos perpendicularmente em relação às paredes perimetrais, um pé direito generoso e janelas altas entre os leitos de ambos os lados do salão garantiam ventilação cruzada e iluminação natural (...) (MIQUELIN, 1992, p. 46).

Figura 2. Enfermaria “Nightingale” do hospital Necker no início do século XIX, Paris, França.



Fonte: <http://www.leplaisirdesdieux.fr>

A partir da Primeira Guerra Mundial, surgem críticas ao modelo pavilhonar devido ao custo crescente dos terrenos urbanos. Neste cenário, consolida-se o edifício monobloco vertical. O novo modelo permite economia na construção e, posteriormente, na operação do edifício hospitalar (MIQUELIN, 1992).

Concomitantemente à verticalização, os equipamentos médico hospitalares, que antes eram complementares à prática profissional, passam a ser essenciais ao diagnóstico e tratamento médico. Durante o Movimento Moderno, além da racionalização dos recursos financeiros e incorporação dos avanços tecnológicos da área da saúde, os hospitais buscam a flexibilidade, expansibilidade, contiguidade de setores e ambientes afins, ordenamento dos fluxos, funcionalidade, habitabilidade e assepsia. A compreensão da influência dos atributos ambientais sobre o bem-estar dos usuários ainda é incipiente. Nestas condições, o conceito de hospital terapêutico é substituído pelo hospital tecnológico. A proposta da arquitetura como resposta espacial às exigências das práticas médicas e ao processo de cura dos seus pacientes modifica seu foco para os avanços tecnológicos em detrimento dos seus usuários. (FOUCAULT, 1984).

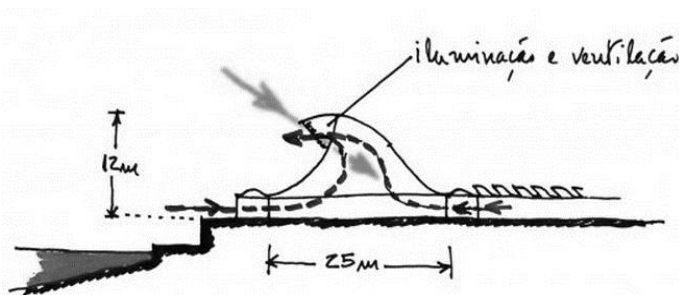
Esta mudança de foco busca de maneira essencialmente funcionalista assegurar a qualidade dos espaços, sem, no entanto, considerar a influência das condições de conforto ambiental sobre os usuários. Neste contexto, no final do século XX, observa-se a necessidade do planejamento de espaços centrado no usuário embasados em estudos

sobre os aspectos de humanização e conforto ambiental em hospitais. As pesquisas nessa área comprovam que aspectos como a possibilidade de controle do ambiente, a presença de distrações positivas, o acesso ao suporte social, iluminação natural, cor, som, aroma, textura, entre outros, podem auxiliar o tratamento médico antecipando a alta dos pacientes (DILANI, 2005; ULRICH et al., 2004). Desta maneira, grande ênfase tem sido dada recentemente a humanização e conforto ambiental das áreas de maior permanência do usuário-paciente, como as Unidades de Internação.

No Brasil, os impactos destas transformações conceituais da arquitetura hospitalar são visíveis nas obras do arquiteto João Filgueiras Lima, mais conhecido como Lelé. Se para o hospital antigo a iluminação e a ventilação natural eram indispensáveis para a eliminação dos *miasmas*, para o novo hospital terapêutico estas estratégias são fundamentais para a saúde e o conforto ambiental dos seus usuários.

A arquitetura assume papel importante na busca do hospital por ser uma máquina de curar (TOLEDO, 2006). O grande destaque de sua produção arquitetônica são os hospitais da rede Sarah Kubitschek, considerados valiosos exemplares da arquitetura bioclimática. Nestas obras de Lelé, a iluminação e ventilação natural são empregadas não apenas como estratégias de conforto ambiental, mas também como elementos de humanização do espaço. Conforme ilustra a Figura 3, coberturas com sheds, pés-direitos altos, galerias de ventilação com nebulizadores, espelhos d'água, solários e jardins internos são alguns dos recursos de desenho que permitem a criação de espaços bem iluminados, ventilados, humanizados e com baixo consumo energético.

Figura 3. Hospitais da rede Sarah Kubitschek.





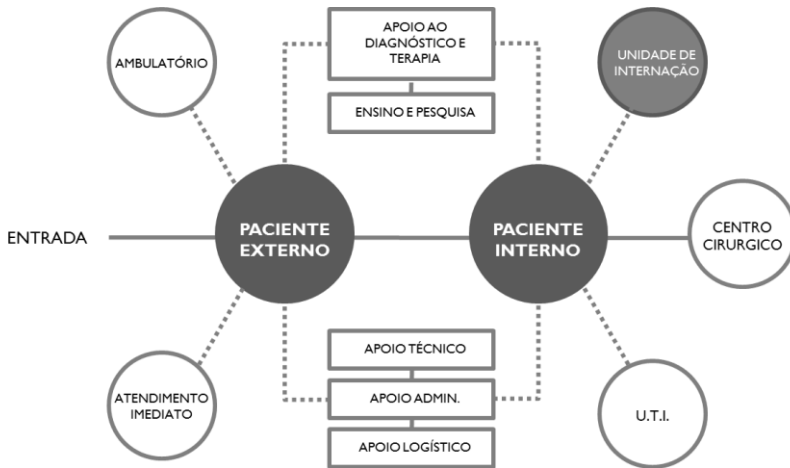
Fonte: Fotos de divulgação do livro "Arquitetura - uma experiência na área da saúde", LIMA, João Filgueiras (Lelé).

Ao longo do século XX, observa-se o aumento da complexidade e da dimensão das edificações que culmina na necessidade de setorização do hospital. Consolida-se a organização físico funcional do hospital atual que está dividido em oito setores: ambulatório, atendimento imediato (pronto-socorro), atendimento no regime de internação, apoio a diagnóstico e terapia, apoio técnico (nutrição, farmácia, lavanderia), ação

para formação e desenvolvimento de recursos humanos (ensino, pesquisa e capacitação), apoio administrativo e apoio logístico. Alguns setores do apoio técnico, como lavanderia e cozinha, costumam ser terceirizados. O setor de ensino e pesquisa se restringe a determinados hospitais.

A Figura 4 apresenta a organização físico funcional do hospital que abrange o atendimento ao paciente externo e ao paciente interno. A unidade de internação merece destaque por representar a maior área útil de um edifício hospitalar e a área de maior permanência pelo usuário-paciente. Conseqüentemente, este é o setor que mais gera insatisfação com relação às condições ambientais do hospital (CARVALHO, 2003; GÔES, 2006).

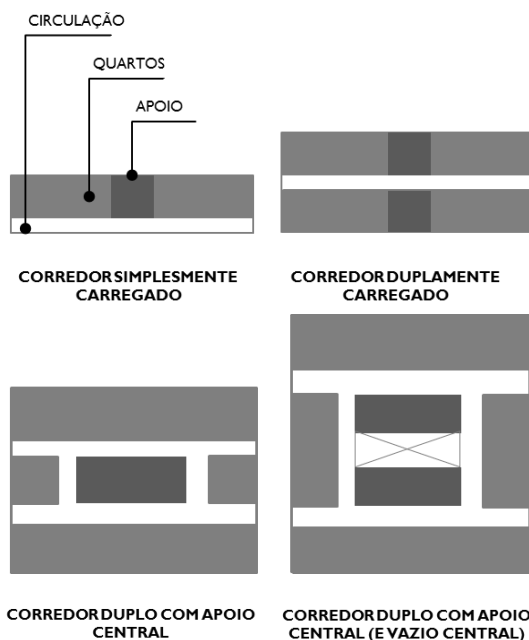
Figura 4. Organização físico funcional do hospital.



A RDC 50 (ANVISA, 2002) define o atendimento em regime de internação como “prestação de atendimento de assistência à saúde de pacientes que necessitam de assistência direta programada por período superior a 24 horas (pacientes internos)”. As unidades de internação variam de acordo com a patologia e a faixa etária dos pacientes, são elas: internação geral (lactentes, crianças, adolescentes e adultos), neonatologia (recém-nascido), UTI (internação intensiva) e internação para queimados.

As tipologias arquitetônicas de uma unidade de internação estão relacionadas diretamente à disposição dos quartos e da área de apoio. Conforme ilustra a Figura 5, as formas mais usuais são: corredor simplesmente carregado, corredor duplamente carregado e corredor duplo com apoio central. A primeira tipologia dispõe os ambientes em apenas um dos lados do corredor. A segunda tipologia apresenta um corredor central com os leitos e apoio em ambos os lados. Por último, a tipologia em corredor duplo com apoio central é aconselhada em unidades que necessitam de grande área de apoio (BRASIL, 2013)

Figura 5. Tipologias de unidades de internação.



A configuração dos quartos de internação depende do número de leitos a ser comportado, podendo ser quartos privativos, semi-privativos e coletivos. O primeiro dispõe de apenas um leito, o segundo dois leitos e o terceiro de três a seis leitos. As configurações mais recorrentes são os quartos privativos e semi-privativos. As vantagens do quarto privativo em comparação ao quarto semi-privativo é um constante questionamento do gestor hospitalar.

Aspectos como o custo de investimento inicial, manutenção, qualidade no atendimento e conforto dos pacientes podem ser influenciados pela configuração espacial dos quartos de internação. Chaudhury et al. (2004) apontam que quartos privativos resultam em melhorias no cuidado ao paciente por garantir maior privacidade, menores níveis de ruído, maior nível de controle sobre o ambiente, redução no risco de infecção cruzada, entre outros.

2.2. VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação é a entrada de ar fresco na edificação controlada por meio de aberturas na envoltória (ventilação natural), ventiladores (mecânica), ou pela combinação de mecanismos naturais e artificiais (híbrida). Existe ainda uma forma de ventilação não controlada denominada infiltração, ocasionada pela entrada do fluxo de ar através de frestas e outras pequenas aberturas.

A ventilação apresenta duas funções importantes: a promoção de conforto térmico e a renovação do ar interno em edificações. As taxas de ventilação necessárias para cada uma dessas funções podem variar. Kolokotroni (2007) afirma que, geralmente, as taxas de ventilação para o conforto térmico são maiores do que as taxas de ventilação exigidas a renovação do ar interno. Rivero (1985) refere-se à essas duas funções como exigências higiênicas e térmicas.

As exigências higiênicas e térmicas estão indicando que a ventilação obedece a necessidades diferentes, já que as primeiras têm caráter permanente e devem ser satisfeitas a qualquer hora e época do ano, enquanto que a segunda só importa quando o microclima interno é quente e o ar exterior tem uma temperatura menor que a interior (RIVERO, 1985, p. 112).

Essa dualidade de funções enfatiza a necessidade de se considerar o contexto climático local para a aplicação da estratégia de ventilação natural. Nas regiões de clima tropical, com temperaturas predominantemente elevadas, a estratégia de ventilação deve atender à ambas as necessidades: higiênicas e térmicas. Nas regiões frias, a ventilação deve ser promovida por razões exclusivamente higiênicas.

2.2.1. Ventilação natural para o conforto térmico

No Brasil, a ventilação natural é, após o sombreamento, a estratégia bioclimática mais importante na busca pelo conforto térmico (LAMBERTS et al., 2012). Edifícios naturalmente ventilados podem proporcionar conforto térmico aos ocupantes e promover o resfriamento estrutural da edificação auxiliado pela inércia térmica. O movimento do ar favorece as trocas de calor entre a pele e o ambiente por meio da convecção e evaporação, e ainda auxilia na remoção das cargas térmicas da edificação.

Os modelos de avaliação do conforto térmico mais usados são baseados nas pesquisas realizadas por Fanger em 1970. O modelo proposto por ele utiliza o princípio do balanço de calor para relacionar as seis variáveis principais de conforto térmico: taxa metabólica, isolamento da vestimenta, temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do ar. A utilização do modelo do PMV (voto médio predito) e PPD (percentagem prevista de insatisfeitos) considera que os limites de conforto são universais e determinados exclusivamente pelas trocas físicas de calor entre o indivíduo e o ambiente estático. As adaptações do indivíduo ao ambiente térmico (trocar de roupa, tomar uma bebida quente, abrir a janela, entre outros) são desconsideradas.

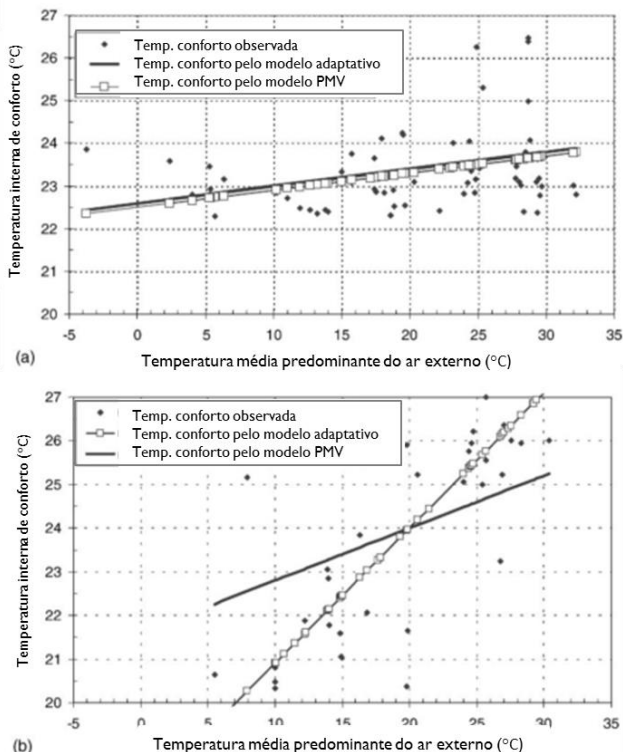
Em 1973, Nicol e Humphreys formularam mudanças nestes conceitos que resultaram na abordagem adaptativa do conforto térmico. Para a análise do conforto térmico adaptativo, os ocupantes de uma edificação não são receptores passivos do ambiente térmico, como propunha o modelo estático, e sim agentes ativos que interagem com o ambiente. Diferentes estudos apontaram que, em climas quentes, as pessoas se sentem confortáveis em temperaturas muito mais altas do que se esperava, pois elas apresentam muitos comportamentos de adaptação (NICOL et al., 2002). Inclusive as pessoas em ambientes condicionados artificialmente são mais exigentes com relação à temperatura do ambiente (DE DEAR et al., 1998).

O modelo adaptativo de conforto térmico, em desenvolvimento desde a década de 70, e atualmente em uso na norma ASHRAE Standard 55 (2013) considera que, além das variáveis como temperatura operativa e velocidade do ar, as condições climáticas nas quais o indivíduo esteve exposto nos últimos dias influenciam seu comportamento de adaptação ao ambiente térmico. Estudos demonstraram a inadequação do modelo estático de conforto térmico para ambientes naturalmente ventilados (DE DEAR et al., 2002; SANTAMOURIS et al., 2006). A Figura 6 apresenta análises do conforto térmico em ambientes condicionados artificialmente

e ambientes naturalmente ventilados, respectivamente. Foram estimadas as temperaturas de conforto pelos modelos PMV e adaptativo para ambos os tipos de ambientes. Observa-se que, em ambientes condicionado artificialmente, o modelo PMV e adaptativo resultam em temperaturas de conforto bastante próximas. Por outro lado, em ambientes naturalmente ventilados, as temperaturas de conforto estimadas pelos modelos diferem-se, sendo o modelo adaptativo mais próximo das temperaturas de conforto apontadas pelos ocupantes.

Outra evidência que motiva a separação entre a análise em ambientes condicionados artificialmente e ambientes naturalmente ventilados é a diferença entre a faixa de temperaturas consideradas aceitáveis. Ambientes condicionados artificialmente resultaram em uma faixa de temperaturas aceitáveis mais restritiva. Isto sugere que os ocupantes de ambientes condicionados artificialmente são mais exigentes quanto ao ambiente térmico.

Figura 6. Temperaturas de conforto observadas pelos pesquisadores e previstas pelos modelos de conforto para (a) ambientes condicionados artificialmente e (b) ambientes naturalmente ventilados.



Fonte: DE DEAR et al., 2002

Fanger et al. (2002) criticaram o modelo adaptativo por negligenciar a atividade metabólica e isolamento da vestimenta. Desta maneira, eles introduziram o modelo PMVnv que trata de uma extensão do tradicional PMV adaptado para ambientes naturalmente ventilados. O modelo considera o chamado “fator de expectativa”, que varia de acordo com as condições climáticas locais (duração do clima quente) e a atividade metabólica estimada. O fator de expectativa é multiplicado pelo PMV tradicional para estimar o voto de sensação térmica para ocupantes de edifícios naturalmente ventilados em climas quentes. O modelo PMVnv foi comparado com o banco de dados de conforto térmico em edifícios

naturalmente ventilados de quatro cidades de clima quente (Bangkok, Brisbane, Atenas e Singapura) e apresentou resultados bastante compatíveis.

A sensibilidade do homem em relação à movimentação do ar em ambientes internos está relacionada à sensação de desconforto localizado devido ao resfriamento local convectivo (draught, draft). Temperatura do ar, velocidade média do ar e intensidade de turbulência do ar são os parâmetros utilizados nas normas ISO 7730 (2005) e ASHRAE Standard 55 (2013) para estimar a porcentagem de indivíduos insatisfeitos com o movimento do ar. De acordo com a equação 1, as normas estabelecem o cálculo da porcentagem de pessoas insatisfeitas pela corrente de ar. A aplicabilidade deste modelo se restringe a pessoas em atividades sedentárias (<1,2 met) e com a temperatura do corpo próxima da neutralidade térmica. Considera-se uma corrente de ar na altura do pescoço, podendo ser superestimada esta taxa, caso a corrente de ar ocorra na altura dos pés ou braços. A ASHRAE Standard 55 (2013) define a velocidade de ar máxima permitida em 0,8m/s para ambientes onde a velocidade do ar não pode ser controlada e 1,2m/s para ambientes com controle local.

$$PD = (34 - t_a)(V - 0,5)^{0,62} \times (37V \times Tu + 3,14)(1)$$

Onde, PD: percentual de pessoas insatisfeitas pela corrente de ar (%), t_a : temperatura do ar interno (°C), V: velocidade média do ar interno (m/s) e Tu: intensidade de turbulência do ar.

Apesar dos limites de velocidades do ar estabelecidos pelas normas, estudos recentes demonstraram que os ocupantes tendem a preferir velocidades do ar mais elevadas. Cândido et al. (2011) e De Vecchi (2011) realizaram estudos sobre a aceitabilidade térmica dos ocupantes de salas de aula, com ênfase na aceitabilidade do movimento do ar. Os estudos foram realizados em diferentes regiões do Brasil com climas bem distintos (Maceió-AL e Florianópolis-SC). Apesar das diferenças climáticas, ambos os experimentos apontam que os ocupantes não apenas adaptam-se a velocidades do ar acima dos limites estabelecidos pela ASHRAE Standard 55 e ISO 7730, como preferem velocidades do ar mais elevadas. Aparentemente, a aceitabilidade térmica sozinha não reflete satisfatoriamente a percepção do ocupante com o seu ambiente térmico.

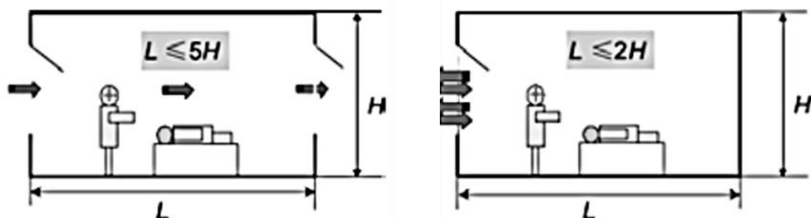
Para Maceió, recomendam-se velocidades do ar de 0,4m/s para temperaturas entre 24°C e 27°C; 0,41m/s à 0,8m/s para temperaturas entre 27°C e 29°C e superior a 0,81m/s para temperaturas entre 29°C e 31°C.

Para Florianópolis, a movimentação do ar até o limite de 0,90m/s é bem aceite em condições de tempo quente e úmido. Segundo Pires (2015) movimentações do ar abaixo de 0,30 m/s não são suficientes para auxiliar nas trocas de calor do indivíduo em um ambiente naturalmente ventilado durante o verão de Florianópolis.

O aumento na velocidade do ar pode amenizar a sensação de desconforto provocada por elevadas temperaturas do ar. Todavia, esta estratégia apresenta algumas limitações em ambiente com ventilação unilateral, pois, mesmo com o aumento da velocidade do ar, o fluxo de ar externo entra no quarto e não consegue percorrer distâncias muito longas (GAN, 2000; PRAJONGSAN et al.,2012). Segundo Gan (2000), a profundidade de um quarto com ventilação unilateral não deve ser maior que 9m ou 11m, dependendo das recomendações de taxas de ventilação para o conforto térmico e qualidade do ar. Em se tratando de uma única janela, o ar entra e sai pela mesma abertura e a diferença de temperatura entre o ar externo e interno é o principal efeito que induz à movimentação do ar. Este efeito apresenta potencial de ventilação mais baixo se comparado à ação dos ventos.

A Figura 7 demonstra as recomendações da OMS (2009) para a relação entre profundidade e altura em enfermarias de acordo com o tipo de ventilação natural utilizado. A ventilação cruzada possibilita uma profundidade muito maior ($L \leq 5H$) do que a ventilação unilateral ($L \leq 2H$). Embora sejam relacionadas a altura e profundidade da sala, o guia da OMS (2009) não menciona a relação do tamanho da própria abertura, sendo aspecto fundamental para melhor aproveitamento da ventilação natural.

Figura 7. Relação de profundidade e altura em enfermarias com ventilação cruzada e ventilação unilateral, respectivamente.



Fonte: OMS (2009)

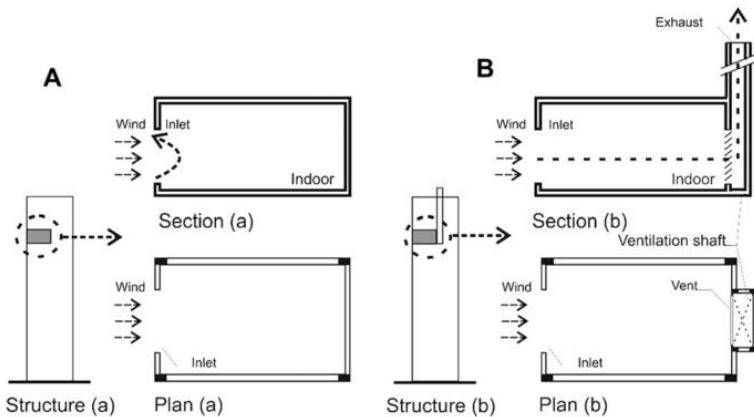
Tendo em vista que a situação mais recorrente em edificações verticais é a ventilação unilateral, Prajongsan et al. (2012) propuseram a

introdução de um shaft para melhorar o desempenho da ventilação em habitações na cidade de Bangkok (Figura 8). Foram investigados o desempenho pela porcentagem das horas de conforto de acordo com o modelo adaptativo da ASHRAE e o efeito de resfriamento de Szokolay (2008), determinado pela equação 2. O cálculo do efeito de resfriamento aplica-se a ambientes com velocidade do ar maior que 2,0m/s.

$$dT = 6 \times Ve - 1,6 \times Ve^2 (2)$$

Onde, dT: efeito de resfriamento (K), $Ve = V - 0,2$ e V: velocidade sobre o corpo do usuário (m/s).

Figura 8. (a) Quarto sem shaft e (b) quarto com shaft.



A habitação com shaft resulta em uma ventilação cruzada, registrando valores bastante superiores de velocidades do ar quando comparada à habitação apenas com a abertura unilateral sem shaft. Mesmo na condição de ventos perpendiculares à abertura e com velocidades elevadas, a habitação sem shaft obteve valores de velocidade do ar interno menores do que 1m/s. Este fato confirma a hipótese de Szokolay (2008) de que o efeito de resfriamento não é aplicável à ambientes com ventilação unilateral onde o movimento do ar é ocasionado exclusivamente pela diferença de temperatura do ambiente interno e externo. Nestes casos, a velocidade do ar só atingiria valores relevantes com uma grande diferença de temperatura, resultando em temperaturas internas muito elevadas. No entanto, o efeito de resfriamento provocado pelo aumento da velocidade do ar na habitação

com shaft gerou um aumento nas horas em conforto térmico de 38% para 56%. Isto sugere uma economia de 2700kWh em cada habitação que utilize shafts, considerando um sistema de ar condicionado do tipo split de 5kWde potência.

Além da velocidade do ar, outro fator importante da ventilação para o conforto térmico é a intensidade de turbulência do ar. Com exceção de ambientes com fluxo de ar controlado, não há constância na direção e velocidade do vento. A todo instante há variações em torno de um valor médio. Estas variações são denominadas turbulências. Apesar de ser considerado um parâmetro importante para o conforto humano, existem poucos estudos que analisam a percepção dos usuários expostos à diferentes condições de turbulência do fluxo de ar. De acordo com Fanger et al. (1986), pessoas expostas à fluxos de ar turbulentos são mais sensíveis ao desconforto localizado do que pessoas expostas ao fluxo laminar. Quando comparado ao fluxo laminar, sob fluxo turbulento a temperatura média de um ambiente pode aumentar em 0,7°C devido ao aumento no potencial de troca de calor por convecção (BITTENCOURT; CANDIDO, 2006)

2.2.1.1.Norma brasileira de conforto térmico

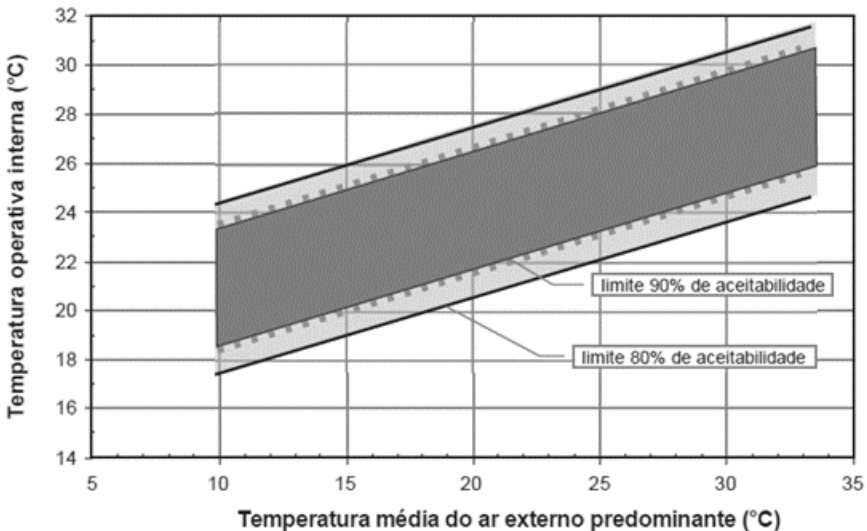
Um importante avanço para a melhoria das condições ambientais nas edificações brasileiras é a criação de uma norma nacional de conforto térmico(LAMBERTS et al., 2013). O projeto da norma brasileira de conforto térmico foi inspirado na ASHRAE Standard 55 (2013), considerado o padrão mais atualizado em função da sua revisão constante de acordo com as novas descobertas científicas no campo da pesquisa em conforto térmico. A norma especifica as condições aceitáveis do ambiente térmico para indivíduos saudáveis ocupando um espaço por mais de 15 minutos. O método para determinação das condições aceitáveis de conforto térmico do ambiente é dividido em duas partes: a primeira parte se aplica em ambientes artificialmente condicionados e a segunda parte em ambientes naturalmente ventilados.

A primeira parte utiliza o modelo do PMV/PPD que parte do princípio do balanço de calor para relacionar as seis variáveis principais de conforto térmico: taxa metabólica, isolamento da vestimenta, temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do ar. A norma estabelece zonas de conforto específicas para o verão (0,5 clo de isolamento da vestimenta) e inverno (1,0 clo de isolamento da vestimenta), prevendo uma aceitabilidade de 90% dos

ocupantes. O conforto térmico de ocupantes com diferentes níveis de isolamento de roupa pode ser calculado por interpolação linear entre os limites de 0,5 e 1,0 clo.

A segunda parte da norma é baseada no modelo adaptativo, onde as condições aceitáveis do conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados dependem da temperatura operativa e da temperatura média predominante do ar externo baseada, no mínimo, nos sete últimos dias antes do dia em questão. Conforme ilustra a Figura 9, a zona de conforto com 80% de aceitabilidade é normativa, enquanto a zona de conforto com 90% de aceitabilidade é informativa. No entanto, esta velocidade do ar pode ser aumentada até o limite de 1,2m/s para compensar a sensação de calor provocada pelo aumento da temperatura em climas quentes. Conforme indica a Tabela 1, ambientes com temperatura operativa superior a 25°C podem ter os limites da temperatura operativa de conforto ampliados quando sujeito a velocidade do ar acima de 0,3m/s.

Figura 9. Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados para velocidade do ar de até 0,3m/s.



Fonte: ASHRAE Standard 55 (2013)

Tabela 1. Aumento do limite da temperatura operativa (Δt_o) resultante de velocidades do ar acima de 0,3m/s.

Velocidade do ar	Aumento do limite da temperatura operativa
0,6 m/s	1,2 °C
0,9 m/s	1,8 °C
1,2 m/s	2,2 °C

Fonte: ASHRAE Standard 55 (2013)

O fato do uso do modelo adaptativo ser restrito a edificações sem sistema de condicionamento de ar instalado limita seriamente o potencial de benefícios ambientais trazidos por estratégias híbridas de condicionamento (natural e artificial). Desta maneira, algumas mudanças em relação à ASHRAE Standard 55 (2013) foram introduzidas na normativa brasileira para torná-la mais acessível, dentre elas o acréscimo da seção 7 - “Formas de avaliar conforto térmico por meio de medições.”-, a recomendação para que edifícios com sistema híbrido de condicionamento sejam avaliados por meio da alternância entre o modelo estático e adaptativo e a flexibilização do requisito de sistema de ar condicionado com a permissão de que este existe desde que não opere durante as horas de ocupação. Os demais requisitos de aplicabilidade do modelo adaptativo são basicamente os mesmos da ASHRAE Standard 55 (2010), devendo o isolamento da vestimenta estar entre 0,5 e 1,0 clo; taxa metabólica entre 1,0 e 1,3 met e a temperatura média predominante do ar externo entre 10 e 33,5°C.

2.2.1.2. Conforto térmico em hospitais

A complexidade na avaliação do conforto térmico é ampliada quando se refere aos ocupantes de um ambiente hospitalar por sua diversidade e pela situação específica de fragilidade de saúde de alguns usuários. Os modelos de avaliação do conforto térmico aplicados mais frequentemente restringem-se à análise de pessoas saudáveis. No Brasil, a NBR 16401 (ABNT, 2008) e o projeto da norma brasileira de conforto

térmico (LAMBERTS et al., 2013) compartilham desta restrição, excluindo um importante usuário dos hospitais: o paciente.

A sensação de conforto térmico dos pacientes pode ser diferente das pessoas saudáveis devido a alterações no metabolismo, pressão arterial, controle da vasoconstrição, habilidade de evapotranspirar, o uso de aparelhos como cadeira de rodas e a ingestão de medicamentos que podem afetar a termo regulação (VERHEYEN et al., 2011). Outro ponto a considerar são as condições psicológicas do paciente internado. O processo de tratamento pode gerar um estado de estresse emocional que se reflete na termo regulação corporal do paciente (YAU et al., 2011). Dependendo do caso, o paciente pode ainda ter a sua capacidade de adaptação térmica reduzida pela falta de controle do ambiente. O hospital deve oferecer mecanismos de adaptação como cobertores, janelas operáveis, ventiladores, ar condicionado, persianas, entre outros.

Alguns estudos avaliaram as diferenças na sensação de conforto dos diversos usuários de um hospital e reconheceram a dificuldade em conciliar as necessidades de todos (KHODAKARAMI et al., 2009; VERHEYEN et al., 2011). Hwang et al. (2007) investigaram a aplicabilidade da ASHRAE Standard 55-2004 em ambientes hospitalares condicionados artificialmente. Para isto, as preferências térmicas e a zona de conforto obtidas em um hospital em Taiwan foram comparadas com outros estudos que aplicaram a ASHRAE Standard 55-2004 em ambientes de escritórios. Os resultados revelaram que a zona de conforto recomendada pela norma é aceitável para os pacientes. Porém, ao contrário dos usuários de escritórios, pacientes preferem sentir-se levemente com calor do que em neutralidade térmica.

Verheyen et al. (2011) avaliaram o conforto térmico entre diferentes grupos de pacientes em um hospital artificialmente condicionado na Bélgica no mês de março (entre inverno e primavera). Foram investigados 99 pacientes dos setores da maternidade, oncologia, neurologia, gastroenterologia, cirurgia abdominal e cirurgia torácica, sendo que 46% dos pacientes estavam deitados ou dormindo no leito durante a medição; 31% realizavam atividades como sentar, ler e escrever e o restante estava em pé ou caminhando. O PMV/PPD foi calculado baseado na ISO 7730 e em um método desenvolvido por Lin e Deng (2008) para o caso dos indivíduos deitados e dormindo. O método do PMV/PPD foi adequado na previsão da sensação térmica da maioria dos pacientes dos setores pesquisados, exceto para o setor de neurologia. Os pacientes da neurologia necessitam de tratamento médico para lesão no cérebro, na medula óssea, no sistema nervoso ou para recuperação cirúrgica. Tendo em vista a importância deste sistema para a termo regulação humana, não

é surpreendente que a percepção de conforto térmico desses pacientes seja significativamente diferente da população saudável.

A principal normativa brasileira que serve como instrumento norteador para o projeto de EAS é a RDC 50 (ANVISA, 2002), denominado Regulamento Técnico destinado ao planejamento, programação, elaboração, avaliação e aprovação de projetos físicos de EAS. Construções novas, ampliações e reformas devem atender a este regulamento. A fiscalização do cumprimento da norma é de responsabilidade das secretarias estaduais e municipais com apoio da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). As condições de conforto térmico estabelecidas pela RDC 50 (ANVISA, 2002) apoiam-se na NBR 16401 (ABNT, 2008).

Com relação às condições ambientais de conforto, a norma RDC 50 (ANVISA, 2002) afirma:

Os sistemas de controle ambiental nos EAS abrangem duas dimensões: a endógena, que considera o edifício em sua finalidade de criar condições desejáveis de salubridade por meio do distanciamento das pessoas das variáveis ambientais externas, e a exógena, que observa os impactos causados pelas construções no meio ambiente externo alterando, de forma positiva ou negativa, suas condições climáticas naturais (ANVISA, 2002, p. 83).

A consideração de que, para “criar condições desejáveis de salubridade” é necessário “o distanciamento das pessoas das variáveis ambientais externas” exclui uma das principais premissas de sustentabilidade nas edificações: o aproveitamento da iluminação e da ventilação natural. Na sequência, a norma se contradiz ao apresentar ambientes que demandam conforto luminoso a partir de fonte natural, como, por exemplo, salas de observação, internação geral, internação de queimados, UTI, quartos, enfermarias, entre outros. Ao contrário da iluminação natural, em nenhum momento a norma cita a importância da ventilação natural para o conforto térmico e a qualidade do ar nestes ambientes.

A obrigatoriedade do uso de ar condicionado é determinada pelo conceito de área crítica, semicrítica e não crítica. As áreas críticas são os ambientes onde existe risco aumentado de transmissão de infecção, onde se realizam procedimentos de risco ou onde se encontram pacientes imunocomprometidos. Estes ambientes devem oferecer condições

especiais de temperatura, umidade e qualidade do ar. Para isto é obrigatório o uso do ar condicionado com filtragem de insuflamento para controlar os agentes contaminantes.

Por outro lado, nas áreas semicríticas, que são os compartimentos ocupados por pacientes com doenças infecciosas de baixa transmissibilidade e doenças não infecciosas, e nas áreas não críticas, que são os demais compartimentos dos EAS não ocupados por pacientes, não é exigido o condicionamento artificial. A RDC 50(ANVISA, 2002) afirma que estes ambientes devem buscar as melhores condições por meio da ventilação e exaustão direta. Todavia, a norma recomenda fortemente o uso de ar condicionado nestes ambientes para que o controle e filtragem do ar sejam garantido. Esta condição desencoraja os projetistas a buscarem por tipologias arquitetônicas que tirem partido da ventilação natural para fins de conforto térmico.

2.2.2.Ventilação natural para a renovação do ar interno

A ASHRAE (2007) define a aceitabilidade do ar interno como “o ar em que não há contaminantes conhecidos em concentrações nocivas e no qual a maioria substancial (80% ou mais) das pessoas expostas não expressa insatisfação”. A ventilação natural como estratégia de controle da qualidade do ar interno baseia-se no fornecimento de ar fresco e na diluição da concentração de poluentes no ambiente (ALLARD et al., 1998). Para De Dear e Brager (2002), velocidades do ar elevadas não permitem apenas que seja atingido o conforto térmico em situações de altas temperaturas, mas também melhoram a qualidade do ar.

A má qualidade do ar pode manifestar sintomas de doenças durante o período de ocupação de edifícios. O termo Síndrome do Edifício Doente (Sick Building Syndrome - SBS) é atribuído pela Organização Mundial da Saúde para edifícios que apresentam alta prevalência de sintomas em seus ocupantes, como: dor de cabeça, problemas nos olhos (irritação, dor secura, coceira ou lacrimejamento), problemas nasais (coriza ou irritação), problemas na garganta (secura, dor ou irritação), problemas no tórax (sensação de opressão e dificuldade respiratória), fadiga e letargia (sonolência e debilidade), anormalidades na pele (secura, coceira ou irritação), e problemas para manter a concentração no trabalho. A ASHRAE (2009) divide os danos causados pelo ar contaminado em quatro categorias: intoxicação, irritação, mau cheiro e danos materiais.

A qualidade do ar é amplamente discutida, sobretudo a qualidade do ar externo pelo seu impacto a nível ambiental e, conseqüentemente, à saúde humana. No entanto, a exposição à poluentes no ambiente interno

é tão importante quanto à exposição à poluentes externos, pois a maior parte da população passa mais de 90% do tempo em ambientes internos (ASHRAE, 2009). A renovação de ar necessária para garantir condições aceitáveis de qualidade do ar interno depende da quantidade e natureza da fonte contaminante. Existem diversos tipos de contaminantes no ar relacionados à ocupação humana (resíduos corporais), atividade humana (fumaça de cigarro, vapor de cozimento, combustão, etc.), materiais do próprio edifício e produtos de limpeza (LEVIN, 2011).

Durante as últimas décadas houve uma evolução nas especificações dos requisitos de taxa de renovação do ar em ambientes internos. Os requisitos eram baseados em experimentos de laboratórios que reconheceram o dióxido de carbono como um indicador apropriado para a definição do nível de qualidade do ar interno (SANTAMOURIS et al. 2006). A maioria das normas internacionais ainda utiliza o nível de dióxido de carbono em suas classificações. No entanto, observou-se a importância de outras fontes contaminantes em determinados tipos de edificações. Segundo Jung et al. (2015), os contaminantes importantes para medições em ambientes hospitalares críticos são monóxido (CO) e dióxido de carbono (CO₂), compostos orgânicos voláteis (TVOC), metanol (HCHO), fungos e bactérias.

Em ambientes hospitalares com alto risco de infecção, a literatura indica variações entre 6 e 12 ACH (trocas de ar por hora). A medida ACH é calculada pela divisão da ventilação absoluta (m³/h) pelo volume do quarto (m³). No entanto, o ACH sozinho pode ser trazer um valor equivocado para determinados volumes de ambientes. Segundo Escombe et al. (2007), a melhor medida para estimar a taxa de ventilação mínima para prevenção de infecção é a ventilação absoluta de um quarto por ocupante (m³/h ou l/s por ocupante).

Condições aceitáveis de qualidade do ar interno podem ser difíceis de serem alcançadas por diversos fatores, dentre eles: a variedade das fontes contaminantes, as condições ambientais (layout, temperatura, umidade, ventilação, iluminação, etc.) e as condições de qualidade do ar externo. Levin (2011) lista alguns dos maiores desafios para o controle da qualidade do ar pela ventilação natural, dentre eles: qualidade do ar externo, condições climáticas locais (ventos, temperatura, umidade), tipologia arquitetônica e controle das aberturas. Estudos sugerem que ambientes com temperatura e umidade do ar mais baixas tendem a apresentar melhores condições de qualidade do ar interno (SANTAMOURIS et al., 2006; ASHRAE, 2007).

Existe a necessidade de pesquisas com visões mais integrativas sobre as condições de conforto ambiental (DE DEAR et al., 2002;

SANTAMOURIS et al., 2006). Com poucas exceções, a maioria das pesquisas analisa a condição ideal a partir de apenas uma característica ambiental. Com relação à ventilação natural, Santamouris et al. (2006) afirma:

Apesar de otimizar a ventilação para controle de qualidade do ar interior, o desafio é conseguir um equilíbrio ideal entre a qualidade do ar interior, conforto térmico, o consumo de energia e impacto ambiental durante os períodos de demanda por aquecimento e arrefecimento (SANTAMOURIS et al., 2006, p.194).

2.2.2.1. Renovação do ar em hospitais

A renovação do ar em hospitais está diretamente relacionada à proteção do ambiente contra a infecção hospitalar. O hospital deve assegurar um padrão mínimo de atendimento ao paciente, incluindo o controle e a prevenção de infecções hospitalares. Caso isto não ocorra e o paciente comprove que contraiu uma infecção por negligência do hospital, a própria instituição pode ser legalmente responsabilizada (AHA, 1979). O controle geral das infecções hospitalares é influenciado pelo próprio projeto arquitetônico. Os problemas básicos do planejamento do hospital incluem os padrões de circulação, os sistemas de transportes de materiais limpos e sujos, facilidade de limpeza de superfícies e materiais, manutenção das instalações prediais e os sistemas de ventilação (ULRICH et al., 2004).

A transmissão e infecção em pacientes ocorre por contato direto com a fonte contaminante ou pelo ar. Estabelecimentos assistenciais à saúde podem conter uma variedade de partículas poluentes no ar, tais como bioaerossóis e gases poluentes liberados a partir de organismos vivos (fungos, bactérias e vírus) e resíduos de gases anestésicos (óxido nítrico, sevoflurano, desflurano, isoflurano e halotano) (YAU et al., 2011).

A ventilação é fundamental para a dissipação destes contaminantes existentes no ar. Os índices desejáveis de ventilação variam de acordo com as funções exercidas em uma determinada área. Áreas críticas como centro cirúrgicos, UTI e quartos de isolamento, por exemplo, necessitam de controles mais rígidos de qualidade do ar, sendo obrigatória a instalação de sistema de condicionamento artificial. Ambientes onde não há obrigatoriedade na instalação de ar condicionado,

como o setor de internação, apresenta enorme potencial para a criação de espaços mais saudáveis para os pacientes, acompanhantes e equipe médica por meio do uso da ventilação natural (ULRICH et al., 2004).

A grande maioria dos estudos de renovação do ar em hospitais são aplicados em áreas críticas artificialmente condicionadas. Estudos analisaram a influência de determinadas características ambientais sobre a qualidade do ar, dentre elas: tipo de filtro do ar condicionado, direção do vento, pressão do ar, trocas de ar por hora, umidade e limpeza do sistema de ventilação (ULRICH et al., 2004).

As lições assimiladas permitiram diminuir drasticamente a taxa de infecção. Entre grupos de pacientes imunocomprometidos, percebeu-se que o uso sistemas de ar condicionado com filtro HEPA (High Efficiency Particulate Air) em quartos de isolamento asseguravam um alto nível de proteção filtragem do ar, diminuindo a incidência de infecções. Percebeu-se também que estes ambientes deveriam ter pressão negativa e prover exaustão do ar diretamente para o exterior. O diferencial de pressão permitiria a entrada de ar do corredor para o quarto, garantindo que o ar contaminado não cruzasse com o ar de outros ambientes. Outro ambiente amplamente investigado em termos de qualidade do ar interno são as salas de cirurgia, onde alternativas como o fluxo laminar horizontal demonstraram ser eficientes na remoção de poluentes no ar (YAU et al., 2011).

Um hospital não pode funcionar eficientemente sem inspeções e manutenção preventiva de todos os equipamentos e infraestrutura física, incluindo os dutos do sistema de ventilação. Hospitais podem ter suas operações suspensas devido à falta de manutenção do sistema de ar condicionado que foi identificado como fonte de proliferação de contaminantes (AHA, 1979).

Atualmente, tem sido discutida a possibilidade de aplicação da estratégia de ventilação natural em hospitais. Além das vantagens do baixo custo de manutenção, a ventilação natural contribui para a diminuição da demanda de energia do edifício por ser uma estratégia de condicionamento passivo. Estudos ainda demonstram que edifícios naturalmente ventilados apresentam menores riscos de desenvolvimento da Síndrome do Edifício Doente. Argiriou et al. (1994) investigaram os problemas de qualidade do ar interno em edifícios de escritórios e hospitais naturalmente ventilados e mecanicamente condicionados. O número de sintomas apresentados pelos ocupantes de edifícios mecanicamente ventilados foi levemente acima do que nos edifícios naturalmente ventilados. Escombe et al. (2007) compararam o risco de infecção hospitalar por meio da transmissão pelo ar entre ambientes

naturalmente ventilados e ambientes mecanicamente condicionados em oito hospitais na cidade de Lima, Peru. Os resultados indicaram que ambientes naturalmente ventilados apresentam um risco menor de infecção do que ambientes mecanicamente ventilados.

A fim de criar parâmetros para garantir a qualidade do ar em ambientes internos, foram estabelecidas normativas com foco no controle dos diversos tipos de contaminantes aos quais cada ambiente está exposto. Em 1973 foi publicada a primeira edição da ANSI/ASHRAE Standard 62.1(2007), a qual não contemplava ambientes hospitalares. Em 2007, foram publicadas recomendações adicionais para laboratórios, indústrias e hospitais. No apêndice E estão prescritas as taxas e condições de abastecimento do ar externo para se ter condição aceitável de qualidade do ar em quartos de internação. Recomenda-se para estes ambientes uma ocupação máxima de 10 pacientes a cada 100m² e uma taxa de ventilação de 13 l/s por pessoa. Estes valores devem ser o suficiente para diluir os biofluentes humanos e outros contaminantes com uma margem de segurança adequada, considerando as variações dos níveis de atividades e saúde das pessoas. As considerações de conforto térmico não estão inclusas neste documento.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda o uso de ventilação natural em áreas não críticas, como o setor de internação geral. Publicado pela OMS (2009), o Guia sobre aplicação da ventilação natural para o controle da infecção em ambientes com risco de infecção transmitida pelo ar estabelece as seguintes taxas mínimas de ventilação:

- 80l/s por paciente para os quartos de internação com risco de infecção;
- 60l/s por paciente para áreas com pacientes externos, quartos de internação e enfermarias em geral;
- 2.5 l/s/m³ para as circulações.

Apesar de não ter valor normativo, esta publicação demonstra o crescente reconhecimento do papel da ventilação natural sobre a qualidade do ar. A última edição do Guidelines for design and Construction of Hospital and Outpatient Facilities, publicado em 2014 pelo Facility Guidelines Institute (FGI), também considera a importância da ventilação natural em ambientes hospitalares. Este documento incorporou na íntegra a ASHRAE Standard 170 – Ventilation of Health Care Facilities(2013)que complementa a ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (ASHRAE, 2007). Sua proposta é melhorar a qualidade do ar interno em

ambientes hospitalares por meio da ventilação, garantindo, simultaneamente, o controle para o conforto, assepsia e odor. A definição dos parâmetros de qualidade do ar interno considera os contaminantes químicos físicos e biológicos que podem afetar a segurança dos pacientes, acompanhantes e equipe médica. Em quartos de pacientes, são recomendadas:

- 4 ACH;
- 60% de umidade relativa do ar máxima;
- Faixa de temperatura entre 21 e 24°C (a normativa aceita temperaturas mais altas ou abaixo desde que atendam preferência dos ocupantes).

As investigações de Memarzadeh et al. (2000) serviram de base para a ASHRAE Standard 170 (ASHRAE, 2013) e indica que 4 ACH resulta em uma condição adequada de ventilação para quartos de internação privativos. Enquanto isso, no Brasil, as normas que estabelecem condições de renovação do ar consideram, exclusivamente, ambientes artificialmente condicionados. Com relação aos projetos hospitalares, a RDC 50 (ANVISA, 2002) se apoia na NBR 7256 (ABNT, 2005), NBR 16401 (ABNT, 2008) e na resolução RE nº 9(ANVISA, 2003). A primeira norma aplica-se somente às áreas críticas, devendo os demais ambientes dos EAS ser orientados pelas outras duas normas.

Para áreas críticas, a NBR 7256 (ABNT, 2005), estabelece alguns parâmetros de projeto para o tratamento de ar de acordo com o ambiente hospitalar. Estes parâmetros são: nível de risco, agente a controlar (biológico, químico, radiológico, etc.), temperatura e umidade relativa do ar, vazão mínima de ar, nível de pressão, filtragem mínima de insuflamento e nível de ruído. Destaca-se os seguintes parâmetros recomendados:

- Vazão de ar mínima de 36 (m³/h) /m² em quartos para internação de transplantados;
- Vazão de ar mínima de 18(m³/h) /m² em quartos para pacientes com infecção transmitida pelo ar;
- Faixa de temperatura do ar de 21 a 24°C para ambos os casos;
- Faixa de Umidade Relativa do Ar de 40 a 60% para ambos os casos.

Para os demais ambientes hospitalares, a parte 3 da norma NBR 16401(ABNT, 2008) e a resolução RE nº 9 (ANVISA, 2003) apresentam recomendações para taxa de renovação de ar e taxa de contaminação química máxima. Os valores são dimensionados considerando os poluentes (biológicos, físicos e químicos) esperados nas condições normais de ocupação dos locais, independentemente do tipo de instalação. Apesar da norma NBR 16401(ABNT, 2008) ser referenciada pela RDC50 (ANVISA, 2002), não consta nenhum ambiente hospitalar na lista dos locais e seus respectivos parâmetros de vazão eficaz mínima de ar exterior para ventilação. A resolução RE nº 9 (ANVISA, 2003) especifica sua aplicação para ambientes de uso público e coletivo e apresenta as seguintes recomendações:

- Taxa de renovação do ar mínima de 27m³/hora/pessoa;
- Taxa de contaminação química máxima de 1000ppm de dióxido de carbono e 80 µg/m³ de aerossóis no ar (indicador da renovação do ar e grau de pureza do ar, respectivamente);
- Faixa de temperatura de Bulbo Seco entre 23 e 26°C no verão e entre 21 e 24°C no inverno;
- Faixa de Umidade Relativa do Ar entre 40 e 65% no verão e entre 35 e 65% no inverno.

A Tabela 2 sintetiza as principais normativas que estabelecem os valores de taxa de renovação do ar para quartos de internação hospitalar. Conforme apresentado, há uma falta de consenso entre as normativas em relação as unidades de medida e valores de taxas de renovação de ar. Chenari et al. (2016) também apresenta críticas sobre a falta de padrão das normativas nacionais (Portugal) e internacionais. Enquanto o guia da OMS (2009), a STANDARD 170 (ASHRAE, 2013), a ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (ASHRAE, 2007) e a RE nº 9 (ANVISA, 2003) são direcionados para áreas não críticas, como é o caso do quarto de internação geral. Sabe-se que situações de internação por doenças infectocontagiosas podem tornar estas áreas críticas. Para estes casos específicos, recomendações são apresentadas NBR7256 (ABNT, 2005) e OMS (2009).

Tabela 2. Quadro comparativos para taxa de renovação do ar em quartos de internação hospitalar.

Normativas	Taxa de renovação do ar
<p>Guia da OMS (OMS, 2009)</p>	<p>80l/s por paciente para os quartos de internação com risco de infecção;</p> <p>60l/s por paciente para quartos de internação e enfermarias em geral;</p>
<p>ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (ASHRAE, 2007)</p>	<p>13l/s por paciente para quarto de internação geral;</p>
<p>ASHRAE Standard 170 (ASHRAE, 2013)</p>	<p>4 ACH em quartos de internação;</p>
<p>RE nº 9 (ANVISA, 2003)</p>	<p>27m³/hora/pessoa para ambientes de uso público;</p>
<p>NBR 7256 (ABNT, 2005)</p>	<p>36 (m³/h) /m² em quartos para internação de transplantados;</p> <p>18(m³/h) /m² em quartos para pacientes com infecção transmitida pelo ar.</p>

2.3.PRINCÍPIOS FÍSICOS DO MOVIMENTO DO AR

A distribuição desigual do aquecimento solar na superfície terrestre produz variações na densidade da massa atmosférica, provocando sua movimentação. O movimento de rotação do planeta também gera movimento nas massas de ar (OLGYAY, 1963). Em menor escala, essa movimentação da massa de ar é chamada de vento. Em edificações, a ação dos ventos e a diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo resultam na ventilação natural.

2.3.1. Ação dos ventos

A ação dos ventos sobre a envoltória de uma edificação cria zonas de pressão positivas (barlavento) e negativas (sotavento) que possibilita a passagem do vento através das aberturas da edificação. Apesar de serem denominadas pressões negativas, as pressões são sempre positivas. A nomenclatura serve para representar as zonas de maior e menor pressão em relação à pressão atmosférica. Quanto maior a diferença de pressão do vento entre as aberturas de entrada e de saída, maior será a eficiência desse processo.

As relações entre as pressões em diferentes pontos das superfícies externas de uma edificação são indicadas pelo coeficiente de pressão do vento (C_p). Os valores de C_p são adimensionais e dependem da forma da edificação, da direção do vento e da influência de obstruções como barreiras arquitetônicas, vegetações e rugosidade do terreno (VERSAGE, 2009).

2.3.2. Diferença de temperaturas

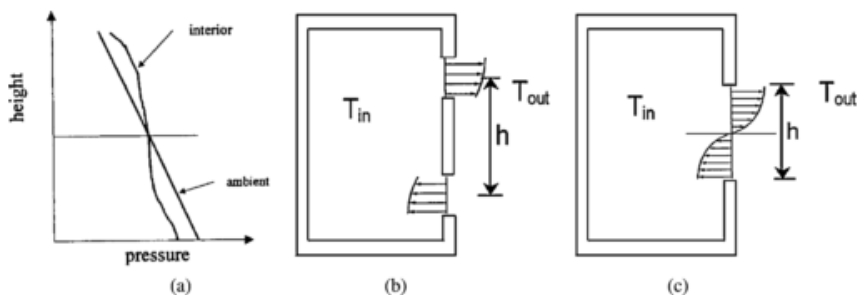
O aquecimento do ar provoca a expansão das moléculas e, conseqüentemente, a diminuição da densidade. Essas alterações fazem com que as massas de ar quente subam sobre as massas de ar frio, criando uma diferença de pressão vertical. Em edificações, a diferença de pressão vertical faz com que o fluxo de ar frio entre e substitua o ar quente que busca a saída pela zona superior do ambiente. Este efeito depende de três fatores principais: a magnitude da diferença de temperatura do ar interno e externo, a distância vertical entre a abertura de entrada e saída do ar e a área das aberturas. Grandes diferenças de temperaturas e distâncias verticais entre aberturas resultam em maiores taxas de ventilação.

A Figura 10(a) ilustra a diferença de pressão entre o ambiente interno e externo. A localização das aberturas também influencia na distribuição das temperaturas no espaço. As Figura 10(b) e (c) demonstram a configuração de um quarto com ventilação unilateral, sendo a primeira com duas aberturas e a segunda com apenas uma única grande abertura. Na primeira configuração, o fluxo de ar entra pela abertura inferior e sai pela superior. Na segunda configuração, uma única abertura serve como entrada e saída do ar na sua parte inferior e superior, respectivamente.

Segundo Allocca et al. (2003), a comparação entre as duas configurações demonstram que a abertura única resulta em taxas de ventilação menores e o ar penetra menos no ambiente. Fluxos de ar mais

fortes são alcançados pelo aumento da distância vertical entre as aberturas e saídas de ar e ainda pelo aumento da diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo.

Figura 10. Distribuição da pressão no ambiente interno e externo (a) causando fluxo de ar através de uma abertura inferior e uma superior (b) ou uma única abertura (c).



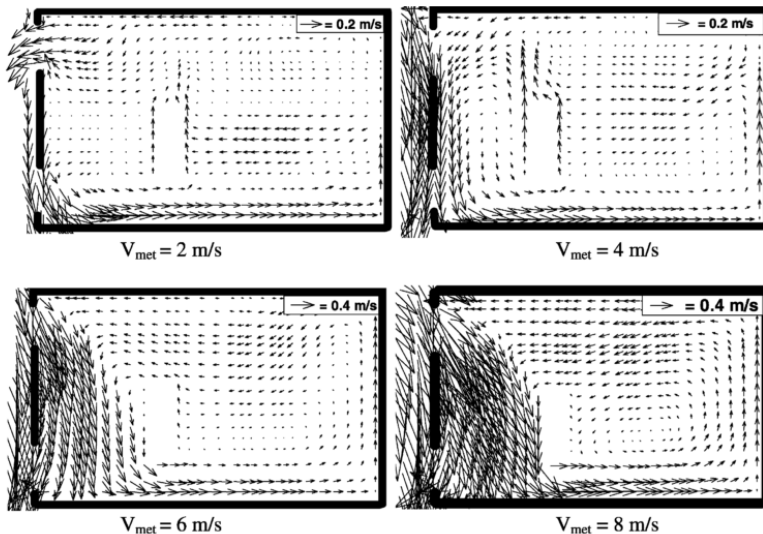
Fonte: Allocca et al. (2003)

2.3.3.Efeito conjunto

Na prática, os edifícios estão sujeitos ao efeito conjunto que contempla a ação do vento e a diferença de temperatura simultaneamente. Apesar do efeito conjunto ocorrer com maior frequência na realidade dos edifícios, geralmente, o cálculo desses efeitos são realizados separadamente. Segundo Larsen et al. (2008), é necessária esta separação dos cálculos porque a ação dos ventos impacta no efeito chaminé resultante da diferença de temperatura do ambiente interno e externo.

O comportamento da combinação da ação do vento e do efeito chaminé em um quarto com ventilação unilateral é investigado por Allocca et al. (2003). Segundo os autores, em situações de baixa disponibilidade de ventos externos, o efeito chaminé é dominante. Neste caso, o fluxo de ar entra no ambiente interno pela janela inferior e sai pela janela superior. No entanto, ao elevar a velocidade do ar externo, a ação do vento se torna dominante. Conforme pode ser observado na Figura 11, a partir de 4m/s o efeito chaminé começa a ser anulado pela ação do vento.

Figura 11. Vetores de velocidade do ar previstos pela simulação CFD para ilustrar a anulação do efeito chaminé com o aumento da velocidade do ar externo.



Fonte: Allocca et al. (2003)

2.4.TIPOS DE VENTILAÇÃO NATURAL

O tamanho, a forma e a localização das aberturas para a ventilação são os principais aspectos do projeto arquitetônico para a determinação do fluxo de ar no interior das edificações (BITTENCOURT et al., 2006). A seguir são apresentadas as estratégias de ventilação natural mais usuais, sendo elas: ventilação cruzada, unilateral e por efeito chaminé.

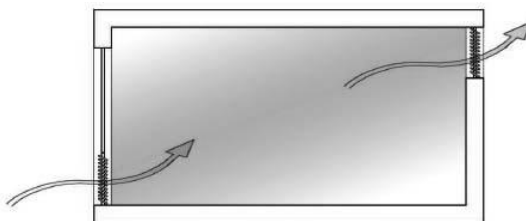
2.4.1.Ventilação cruzada

A ventilação cruzada, ilustrada pela Figura 12, ocorre em ambientes com duas ou mais aberturas em diferentes fachadas. O efeito da ventilação cruzada ocorre em função da diferença de pressão gerada pelos ventos incidentes na edificação. Esta estratégia apresenta melhor desempenho em ambientes de planta livre por possuírem menos obstáculos para o fluxo de ar. A ventilação cruzada possibilita não apenas maximizar a velocidade do ar, mas também aumentar a área de

abrangência da ventilação em um ambiente. Prajongsan et al. (2012) confirmaram por meio de simulações CFD que a velocidade do ar que entra em um ambiente com ventilação unilateral rapidamente diminui para 0 m/s. Por outro lado, em um ambiente com ventilação cruzada, a ventilação atinge seu valor mínimo a uma distância de 4 metros da abertura de entrada do ar e depois volta a subir seu valor quando se aproxima da abertura de saída do ar.

Segundo Aflaki et al. (2016), a ventilação cruzada resulta em maiores taxa de renovação do ar quando comparada a ventilação unilateral com apenas uma abertura da fachada. No entanto, os estudos de Chenari et al. (2016) complementam estes resultados. Para eles, a ventilação cruzada nem sempre apresentam melhor desempenho do que a ventilação unilateral. Em casos onde o vento é desfavorável (direção e velocidade), o desempenho de ambas as estratégias se assemelham.

Figura 12. Ventilação cruzada.



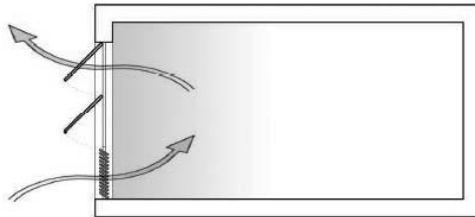
Fonte: Scottish Executive (2007)

Embora a ventilação cruzada seja vantajosa para o aproveitamento da ventilação natural, a maioria dos ambientes hospitalares são ventilados unilateralmente. A localização dos hospitais, geralmente em centros urbanos, demanda edifícios verticalizados com tipologias que dificultam a adoção de outras estratégias de ventilação.

2.4.2. Ventilação unilateral

A ventilação unilateral, ilustrada pela Figura 13, ocorre em ambientes com aberturas em apenas uma das fachadas. Esta é a estratégia mais empregada em quartos de internação.

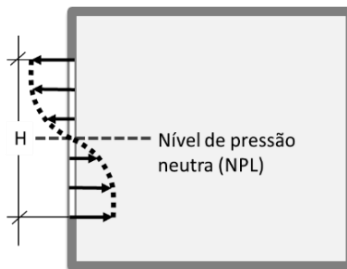
Figura 13. Ventilação unilateral.



Fonte: Scottish Executive (2007)

Ambientes com ventilação unilateral sofrem influência, principalmente, do efeito de diferença de temperatura (ALLOCCA et al., 2003; SCHULZE et al., 2013). O ar quente do ambiente interno sobe e sai pela porção de cima da abertura, enquanto o ar frio que vem do ambiente externo entra pela porção inferior da abertura. Como consequência, existe uma altura na qual o fluxo de ar é invertido. Nesta altura, a diferença de pressão é nula, correspondendo a chamada nível de pressão neutra (NPL – neutral pressure level), ilustrada pela Figura 14. A altura na NPL depende da distribuição e características das aberturas (STABAT et al., 2012).

Figura 14. Efeito da diferença de pressão sobre a ventilação unilateral.



Por outro lado, o efeito da ação dos ventos também pode influenciar no desempenho desta estratégia. Estudos em túneis de vento demonstraram que esta influência depende da velocidade e do ângulo de incidência dos ventos (LARSEN et al., 2008). Para que o efeito da ação dos ventos seja a força dominante na ventilação unilateral, a velocidade do ar externo deve ser superior à 1m/s (ALLOCCA et al., 2003; PRAJONGSAN et al., 2012).

As diferentes configurações das aberturas apresentam papel fundamental na eficiência desta estratégia. Diversos estudos investigaram diferentes tipos e configurações de janelas em ambientes com ventilação unilateral (GRATIA et al. (2004); ADAMU et al. (2012); RUAN et al. (2012) e SCHULZE et al. (2013). A ventilação unilateral com duas janelas na mesma fachada resultou em um aumento na taxa de ventilação em relação a ventilação unilateral com uma única janela pelo simples fato de segregar o fluxo de ar quente e frio. Quanto maior for a altura total da abertura, no caso de uma única abertura unilateral, ou a distância entre a altura superior e inferior, no caso de duas aberturas unilaterais, melhor o desempenho da ventilação.

2.5. MODELOS DE AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO

O desempenho da ventilação natural é um fenômeno complexo de ser modelado devido à variabilidade da velocidade e direção do vento de acordo com a localização da edificação. Atualmente, existem modelos bem desenvolvidos para avaliação da ventilação em edificações, porém sua aplicação se dá mais a nível de pesquisa do que de processo de projeto. Os modelos variam de simples algoritmos empíricos para cálculo da taxa de ventilação global até técnicas sofisticadas de CFD para solucionar equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos, chamadas equações Navier-Stokes (ALLARD et al., 1998). A recomendação do modelo adequado está relacionada ao nível de complexidade do estudo de caso. Em geral, os modelos de avaliação da ventilação em edifícios são: modelos empíricos, modelos zonais e modelos CFD.

2.5.1. Modelos empíricos

Modelos empíricos consistem em expressões de cálculos simplificados para taxa de ventilação. Estas expressões combinam fluxo do ar, velocidade do ar e diferença de temperatura. A possibilidade de obtenção de estimativas rápidas torna esta ferramenta muito útil para aplicação em geometrias simples. No caso de geometrias mais complexas, que possuam envoltórias com planos inclinados ou barreiras internas, outros modelos devem ser adotados (KOLOKOTRONI, 2007). A precisão dos resultados obtidos pelos modelos empíricos depende de alguns parâmetros de cálculo da ventilação, como: coeficiente de pressão e coeficiente de descarga.

2.5.2. Modelos zonais

Modelos zonais consistem em redes do fluxo de ar determinadas pelas aberturas e zonas da edificação. A rede possui diversos caminhos do fluxo de ar que conectam as zonas ou ambientes com diferentes pressões e temperaturas. As ligações entre as aberturas e as zonas da edificação resultam nos caminhos do fluxo de ar. As janelas podem adotar diferentes fatores de aberturas ou ainda estarem fechadas, permitindo a passagem da ventilação por infiltração. Este modelo pode ser de zona única ou zona múltipla. O primeiro modelo pode ser adequado a edificações com planta livre ou a habitações pequenas. Já o segundo modelo se adequa a situações mais complexas de edificações divididas em diferentes ambientes, onde pressão e temperatura do ar interno se diferem (KOLOKOTRONI, 2007). Com o avanço da capacidade de processamento de dados dos computadores, tais modelos tendem a ser substituídos pelos modelos CFD.

2.5.3. Modelo CFD (Computational Fluid Dynamic)

Os programas de CFD (Computational fluid dynamic) surgiram em função da indústria aeroespacial nas décadas de 1960 e 1970. A aplicação dessas ferramentas em edificações é mais recente. Em geral, o fluxo de ar é analisado a partir da distribuição da velocidade do ar, temperatura, umidade, intensidade da turbulência e concentração de contaminantes. Os modelos CFD são baseados nas equações de Navier-Stokes, as quais solucionam equações diferenciais de massa, momento, energia, composição química e turbulência em todos os pontos que representam uma edificação e seu entorno. Os valores desconhecidos de

pressão, velocidade e temperatura são determinadas pelas condições iniciais e de contorno (ZHAI, 2006; KOLOKOTRONI, 2007). Devem ser especificadas as propriedades e comportamento do fluido a ser analisado.

No caso da análise do fluxo de ar no interior de uma edificação, devem ser especificadas, principalmente: velocidade e direção do vento, temperatura do ar externo, pressão, modelo de turbulência, tipo de terreno e propriedades térmicas dos materiais da edificação (STABAT et al., 2012). Estas condições de contorno são aplicadas ao chamado domínio do modelo, que deve ser dimensionado para abranger a área de interesse do estudo.

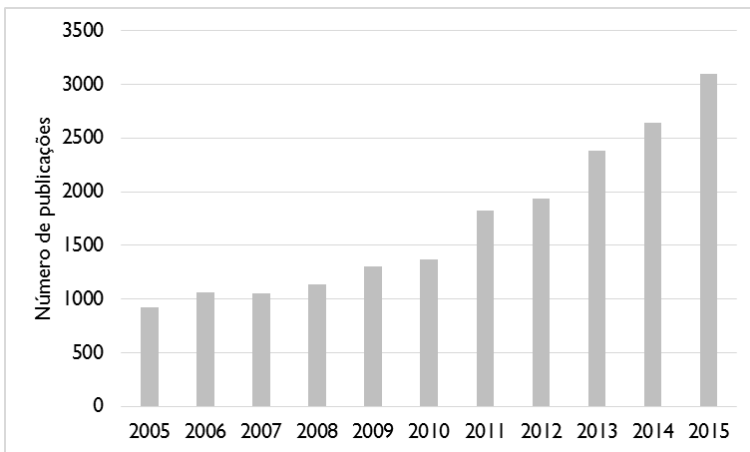
Alguns programas CFD permitem o monitoramento nos processos de convergência das variáveis solicitadas e identificam problemas ocasionais. Estudos feitos em CFD podem demorar bastante tempo para serem simulados. Dois parâmetros apresentam grande impacto no tempo de simulação e na precisão dos resultados: o modelo de turbulência a ser utilizado e o tamanho da malha de avaliação.

Todo ambiente ventilado naturalmente está exposto a um fluxo de ar turbulento que não pode ser negligenciado (NIELSEN, 2015). Estas turbulências são causadas por flutuações dependentes do tempo e do espaço. Os conceitos iniciais de escoamento turbulento foram apresentados por Reynolds em 1883, aprimorado por Boussinesq em 1887. Diversos modelos de turbulência são contemplados pelos programas de CFD e devem ser escolhidos de acordo com o caso a ser simulado. CHAM (2008) recomenda o modelo de turbulência LVEL para simulações que envolvam fluxo de ar e trocas de calor, simultaneamente.

Igualmente relevante é o tamanho da malha de avaliação. Esta funciona como uma “rede de pesca”, onde quanto mais refinada mais detalhes serão capturados. Porém, o refinamento deve ser de acordo com a escala do fenômeno explorado. Caso contrário, a simulação pode ser inviabilizada pela sobrecarga na capacidade dos computadores. Em situações onde se deseja trabalhar com diferentes escalas, como por exemplo, na escala urbana e um quarto, a simulação deve ser feita em etapas. Na primeira etapa, a escala urbana é simulada com uma malha de tamanho suficiente para obtenção de valores precisos sobre as condições externas ao quarto. Na segunda etapa, o quarto é simulado para um tamanho de malha adequado, sendo especificados os valores das condições externas obtidos na primeira etapa (ZHAI, 2006).

A Figura 15 apresenta a progressão das publicações encontrados na base de dados Scopus e Science Direct com a busca pelos termos “CFD AND building”. Observa-se o crescimento pelo interesse em pesquisas que apliquem simulações CFD em edificações.

Figura 15. Progressão das publicações com simulações CFD em edifícios (termos de busca “CFD AND building”).



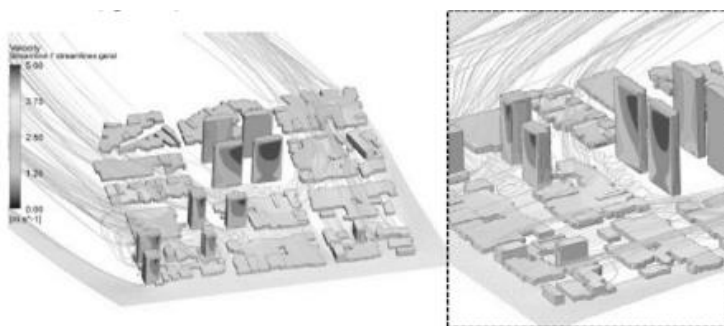
Fonte: Base de dados Scopus e ScienceDirect.

Apesar do significativo crescimento de sua aplicação, esta é uma ferramenta mais apropriada para pesquisa do que para o processo de projeto. Isto porque é necessário um conhecimento mais aprofundado para interpretar os resultados obtidos pelos modelos CFD. Todavia, são apontadas algumas tendências que podem mudar este cenário atual. A primeira tendência é a possibilidade de integração do CFD com outros programas de modelagem de edificação. Os programas de CFD dificultam a modelagem de geometrias que são extremamente simples de serem realizadas com software específicos para modelagem. Outra tendência é a melhora na interface do programa que, atualmente, não é amigável para os seus usuários. Esta simplificação poderia tornar mais intuitivo o uso de determinados comandos que hoje demandam mais tempo para sua compreensão. Por fim, destaca-se a tendência de tornar as simulações mais rápidas. Engenheiros e arquitetos necessitam de respostas rápidas no seu processo de projeto.

2.5.3.1. Avaliação do conforto térmico e renovação do ar por meio da simulação CFD

Programas CFD podem ser aplicados a diferentes campos do conhecimento. No que se refere à sua aplicação na arquitetura e urbanismo, as simulações proporcionam análises qualitativas e quantitativas do desempenho da ventilação natural no ambiente construído. A versatilidade da ferramenta permite sua aplicação para propostas de ocupação do solo com estudos sobre a influência de aglomerações urbanas sobre o escoamento do ar nas cidades, diretamente associado ao processo de planejamento urbano. A Figura 16 apresenta os estudos de Leite (2015) sobre a influência das aglomerações urbanas sobre o fluxo de ar.

Figura 16. Desvios nos ventos causados por edificações mais altas em aglomerações urbanas.



Fonte: Leite (2015)

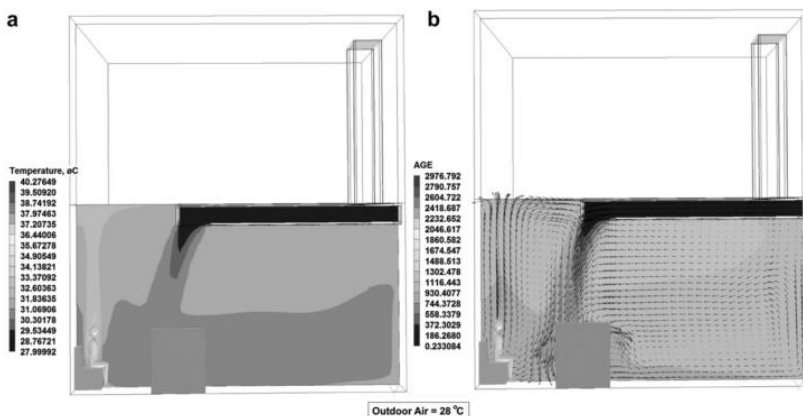
Em escala menores, a simulação permite avaliar o conforto térmico e a renovação do ar, a partir de uma análise detalhada do comportamento das correntes de ar em qualquer ponto no espaço. Os modelos CFD são capazes de revelar três fatores determinantes para o conforto dos ocupantes: velocidade do ar, temperatura operativa e taxa de renovação do ar. A distribuição desses valores sobre diferentes pontos no espaço permite uma aproximação das condições ambientais que interagem diretamente com o ocupante.

Estudos de conforto térmico e renovação de ar podem ser aplicados ao microambiente do corpo humano e o impacto no seu entorno

imediatamente. Melikov (2015) investigou esta interação em compartimentos de automóveis, aviões, ônibus, trem, entre outros veículos de transportes.

Com relação às edificações, esta ferramenta pode ser útil na investigação de diferentes estratégias de ventilação natural para o conforto térmico e qualidade do ar. Adamu et al. (2012) avaliaram a renovação do ar de quatro estratégias de ventilação natural em um quarto individual de um hospital em Londres. As estratégias foram: abertura unilateral simples, abertura unilateral dupla, abertura unilateral com torre de ventilação e abertura unilateral com saída pelo forro (Figura 18). Foram consideradas diferentes frações de aberturas (60% e 100%) para o período de verão. A renovação do ar foi analisada com base no comparativo entre os valores de trocas de ar encontrados no modelo CFD e os valores recomendados pela HTM 03.01 - Health Technical Memorandum Specialised ventilation for healthcare premises - e pelo guia da OMS. O conforto térmico também foi avaliado, porém por meio do software de análise térmica IES.

Figura 17. Resultados da simulação CFD para o quarto com abertura unilateral com saída pelo forro no verão.



Fonte: Adamu et al. (2012).

Outra aplicação dos modelos CFD é a possibilidade de determinar a profundidade máxima de um ambiente para que se alcance níveis aceitáveis de conforto térmico e renovação do ar em todo o ambiente interno. Gan (2000) investigou a profundidade efetiva de uma sala com ventilação unilateral e diferentes fatores de abertura. Os resultados encontrados indicaram que a profundidade efetiva para o

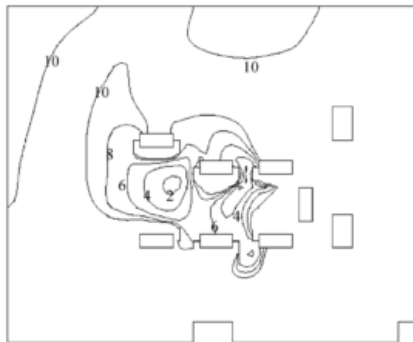
conforto térmico é de 9m e não coincide com a profundidade efetiva para a renovação do ar, que é de 13m.

A influência do mobiliário sobre o comportamento do fluxo de ar e o conforto térmico também pode ser visualizada por meio de simulações CFD. Park e Battaglia (2014) modelaram uma sala de escritório vazia e outra mobiliada, com a temperaturas do ar externo de 10°C e 22°C. Para avaliar as condições de conforto térmico, adotou-se os limites de temperatura e velocidade do ar estabelecidos pela ASHRAE (2010). Os contornos de temperatura interna do ar apresentados pelo escritório vazio e mobiliado foram similares, no entanto, a velocidade do ar foi levemente superior no escritório vazio.

Ainda com relação as avaliações de conforto térmico, pode ser feita a análise da diferença de temperatura do ar vertical sobre os usuários. Chow e Yang (2003) e Mohammed (2013) compararam os resultados da diferença de temperatura do ar vertical com as recomendações da ISO7730 que estabelece um limite de 3°C/m. Para isto, foram utilizados os valores de temperatura do ar na altura de 0,1m e 1,1m.

Simulações CFD avançadas permitem ainda um aprofundamento sobre a qualidade de ar por meio da análise da dispersão de contaminantes no ambiente interno (VAN HOOFF; BLOCKEN, 2013). Os poucos estudos que aplicam esta ferramenta em um ambiente hospitalar, apresentam como foco os ambientes críticos, onde o ar condicionado é essencial para o controle da qualidade do ar. Chow e Yang (2003) simularam a dispersão dos contaminantes em uma sala de cirurgia com insuflamento de ar pelo forro e saída de ar pelas grelhas nas paredes laterais. A taxa de renovação do ar foi comparada com as especificações da HTM para salas de cirurgia e resultou em um nível adequado. Contudo, conforme ilustra a Figura 18, a análise da dispersão de contaminantes revelou a criação de uma zona de concentração de contaminantes acima do leito cirúrgico. Segundo os pesquisadores, isto deve-se ao mal posicionamento das duas luminárias acima do leito cirúrgico que impede o efeito de dispersão dessas partículas no ar.

Figura 18. Mapa de concentração de bactérias no ar sobre o leito cirúrgico.



Fonte: Chow e Yang (2003).

2.5.4. Integração de modelos de análise térmica e da ventilação

Os modelos de análise térmica consideram as trocas de calor no ambiente interno e externo, prevendo os efeitos de condução, convecção, radiação, massa térmica, ganhos de calor pela envoltória e outras formas de trocas de calor. Estes modelos não são capazes de analisar o comportamento do fluxo de ar no ambiente, porém providenciam informações sobre o impacto da ventilação na renovação do ar e conforto térmico para todas as horas do ano. Por outro lado, em uma condição estática, o modelo CFD detalha o comportamento do fluxo de ar externo e interno.

Os modelos de análise térmica podem ser integrados a modelos CFD para determinar o impacto da ventilação sobre a demanda energética para resfriamento do ar, conforto térmico dos usuários e renovação do ar interno. Muitos estudos defendem a integração entre os dois modelos para eliminar suas limitações (SANTAMOURIS et al., 2006; KOLOKOTRONI, 2007 ; ADAMU et al., 2012; ZHANG et al., 2013).

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos e documentos revisados demonstram a importância da arquitetura hospitalar para a criação de espaços que auxiliem no processo de cura dos pacientes em regime de internação. Diversos aspectos da arquitetura contribuem para o conforto ambiental. Como foco

deste trabalho, a ventilação é fator determinante para o conforto térmico e a renovação do ar em edificações hospitalares.

Sabe-se que o conforto térmico pode auxiliar no processo de cura dos pacientes e melhorar o bem-estar, segurança e saúde da equipe médica. No entanto, há uma lacuna no conhecimento sobre o conforto térmico em pessoas com saúde fragilizadas. Estudos encontrados não especificam uma faixa de conforto para pessoas doentes, mas apontam uma preferência por temperaturas levemente mais altas. Devido à falta de informações conclusivas, nesta pesquisa serão utilizados os limites de faixa de conforto para adultos saudáveis.

As referências ainda apontam a crescente discussão sobre a aplicação da ventilação natural para a melhoria da qualidade do ar interno em edificações. Estudos demonstram que edifícios naturalmente ventilados apresentam menores riscos de desenvolvimento da Síndrome do Edifício Doente. No caso dos ambientes hospitalares onde não há a obrigatoriedade da instalação de ar condicionado, como o setor de internação, a Organização Mundial da Saúde (2009) recomenda o uso da ventilação natural.

Observa-se que a localização dos hospitais nos grandes centros urbanos, onde predomina o modelo do monobloco vertical para melhor aproveitamento do terreno, dificulta a adoção de estratégias de ventilação cruzada. Sendo assim, a maioria dos ambientes de internação hospitalar possuem ventilação unilateral, com uma única abertura na fachada. Estudos apresentados anteriormente que discutiram o comportamento da entrada e saída do ar em ambientes com ventilação unilateral serviram de subsídio para os modelos de simulação.

Ao final da revisão bibliográfica foram apresentados os modelos de avaliação da ventilação natural de maneira a contribuir para a definição da metodologia desta pesquisa. Os principais estudos com ênfase na ventilação utilizam modelos de simulação CFD, indispensáveis para a análise detalhada do desempenho dos fluxos de ar. Esta ferramenta é apresentada como solução para algumas limitações dos modelos de rede. Entretanto, tal modelo ainda não permite realizar simulações anuais para avaliar o desempenho térmico das edificações e apresenta limitações em relação à integração com arquivos climáticos para realizar simulações dinâmicas.

3.METODOLOGIA

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar o conforto térmico e a renovação do ar interno em quartos de internação naturalmente ventilados em Florianópolis. Neste capítulo são apresentados os métodos e ferramentas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho. Conforme indica a Figura 19, o estudo está dividido em três etapas que condizem com os subcapítulos da metodologia.

Figura 19. Síntese das etapas do estudo.



A primeira etapa abrange a definição dos casos de estudo. Nesta etapa foi realizada a análise climática da cidade de Florianópolis que serviu de insumo para a definição das condições de contorno das simulações CFD. A seguir, foram caracterizados os três quartos de internação a serem investigados.

A segunda etapa consiste na modelagem CFD. O caso base foi utilizado como partido para a criação dos demais cenários de quartos de internação naturalmente ventilados. Esta etapa envolve todos os aspectos do processo de simulação, partindo da determinação do domínio, malha de avaliação, número de iterações e construção da geometria.

Por fim, a terceira etapa abrange o processamento dos dados e análise dos resultados. As variáveis exploradas para a avaliação do conforto térmico adaptativo e a renovação do ar interno nos quartos de internação foram: distribuição da velocidade do ar, distribuição da temperatura do ar e taxa de renovação do ar por paciente.

3.1. ETAPA 1: DEFINIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

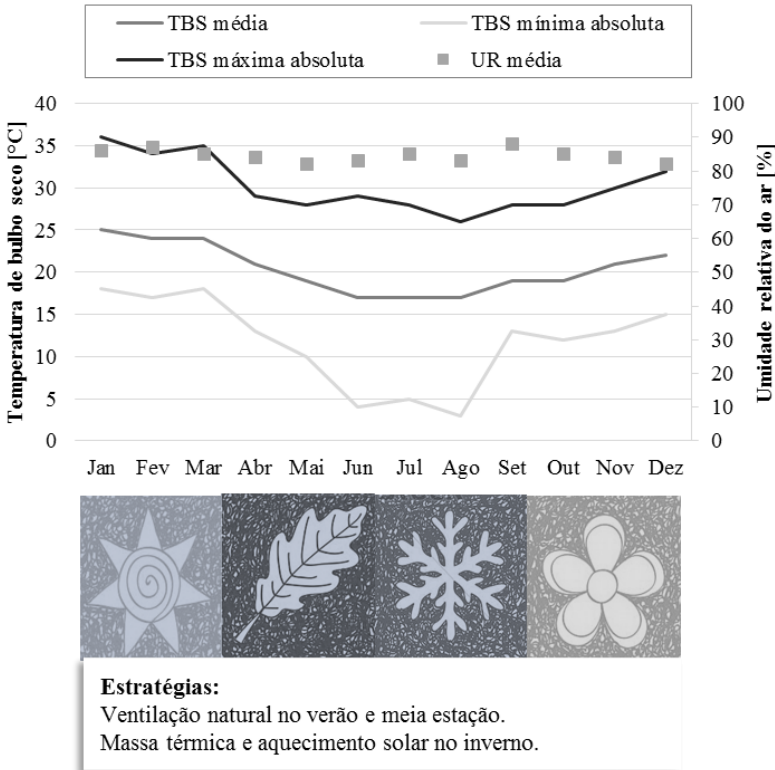
3.1.1. Análise climática

A análise climática utilizou-se o arquivo climático da cidade de Florianópolis do tipo TRY (Test Reference Year), de 1963. O arquivo inclui dados da região adotada e representa um ano climático médio, dentro de uma série de 10 anos. Florianópolis localiza-se na região sul do Brasil, na latitude 27,7° S, longitude 48,5° W e a uma altitude de referência de 7m em relação ao nível do mar. O zoneamento bioclimático brasileiro estabelecido pela NBR 15220 (ABNT, 2003) divide o país em oito zonas, sendo que Florianópolis encontra-se na ZB3.

Seu clima é classificado como mesotérmico úmido com as estações do ano bem definidas (Figura 20). O conforto térmico é alcançado em 29% das horas do ano, sendo o período de desconforto correspondente à 71% das horas do ano. A amplitude térmica desta cidade apresenta-se como desafio para a aplicação de estratégias bioclimáticas que amenizem o calor no verão e o frio no inverno. As estratégias mais indicadas são a ventilação durante o verão e meia estação, a massa térmica e aquecimento solar durante o inverno (LAMBERTS et al., 2012).

A Figura 20 apresenta o gráfico das temperaturas mensais de bulbo seco ao longo do ano. Os meses mais quentes são janeiro, fevereiro e março com médias de 25°C, 24°C e 24°C, respectivamente. As temperaturas de bulbo seco máximas registradas são de 36°C em janeiro, 34°C em fevereiro e 35°C em março. Com relação às temperaturas média diurnas, o mês de janeiro é o mais quente com 26,6°C. A cidade de Florianópolis apresenta um clima úmido influenciado pela proximidade com o mar. Os valores médios da umidade relativa do ar registrados durante o ano todo superam 80%.

Figura 20. Temperaturas de bulbo seco média, mínima absoluta e máxima ao longo do ano.



Pelo fato das simulações CFD representarem o comportamento do fluido em uma fração de tempo, foram analisadas as temperaturas do ar e regime dos ventos por histogramas de frequência de ocorrência que devem definir os parâmetros utilizados nas simulações.

Os histogramas de frequência de ocorrência de temperaturas revelam as temperaturas de bulbo seco mais recorrentes no verão (2159 horas) e na meia estação (2496 horas), que corresponde ao outono e primavera. O inverno foi excluído na análise pelo fato da ventilação natural ser indesejável para fins de conforto térmico neste período.

Conforme ilustra a Figura 21 e a Figura 22, o intervalo de temperatura mais frequente é entre 24°C e 25°C no verão (21 de dezembro

a 20 de março), representando 14% do total de horas. Enquanto na meia estação (20 de março a 20 de junho e 22 de setembro a 21 de dezembro), a temperatura mais frequente é entre 19°C e 20°C, correspondendo a 13% do total de horas deste período.

Figura 21. Histograma de frequência de ocorrência temperatura de bulbo seco no verão.

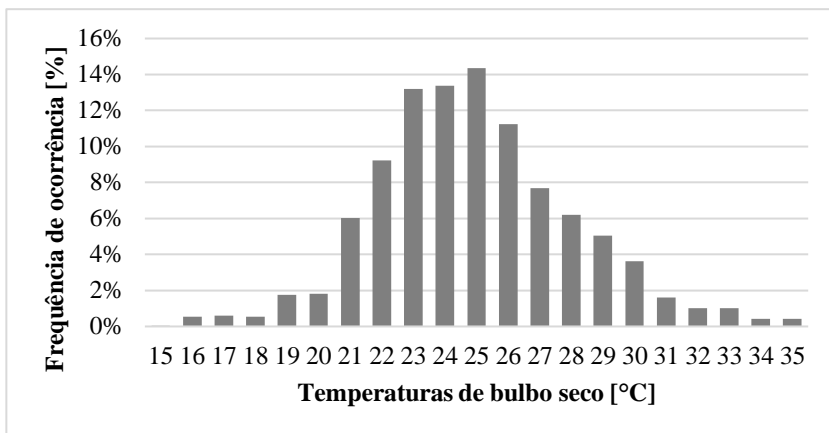
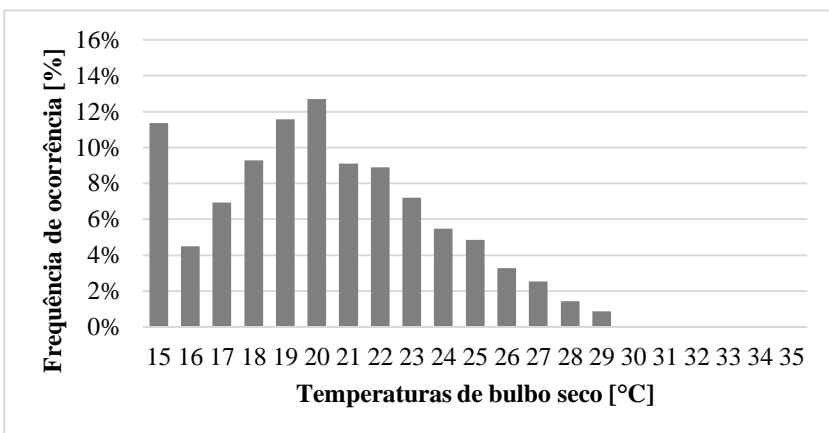


Figura 22. Histograma de frequência de ocorrência temperatura de bulbo seco na meia estação.



O regime dos ventos também foi analisado pela frequência de ocorrência e velocidades predominantes por direção nas diferentes estações do ano. Conforme demonstra a , os ventos norte e nordeste predominam em ambos os períodos. No verão o vento predominante é o nordeste com frequência de ocorrência de 21%, seguido do vento norte com 14%. Na meia estação o vento norte representa 18% das horas, nordeste 15% e sudoeste 15%.

O histograma de frequência de ocorrência apresentado pela Figura 24 indica que uma faixa de velocidade do ar recorrentes de 0 à 6 m/s. Tanto no verão quanto no outono e primavera, a velocidade do ar mais frequente está entre 2 e 3m/s, totalizando 23% das horas de ambos os períodos. Cabe ressaltar que as velocidades do vento tendem a ser maiores no verão.

Figura 23. Histograma de frequência de ocorrência dos ventos no verão, primavera e outono.

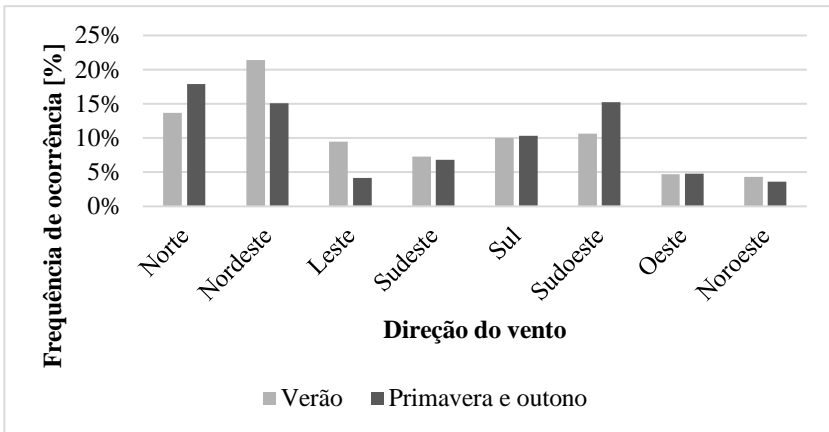
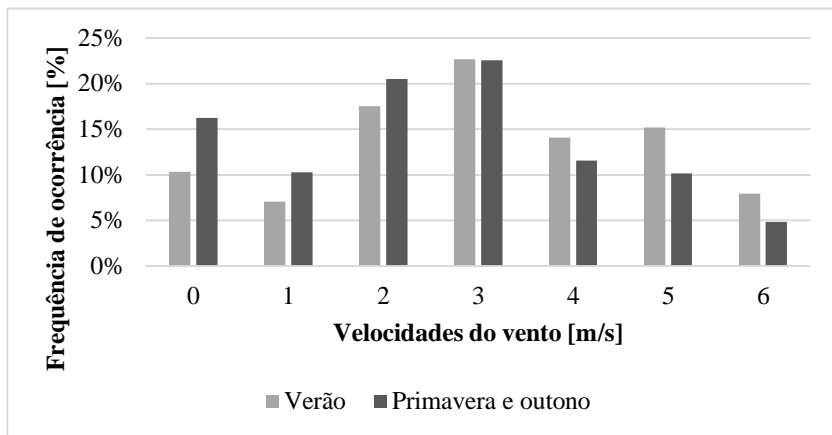
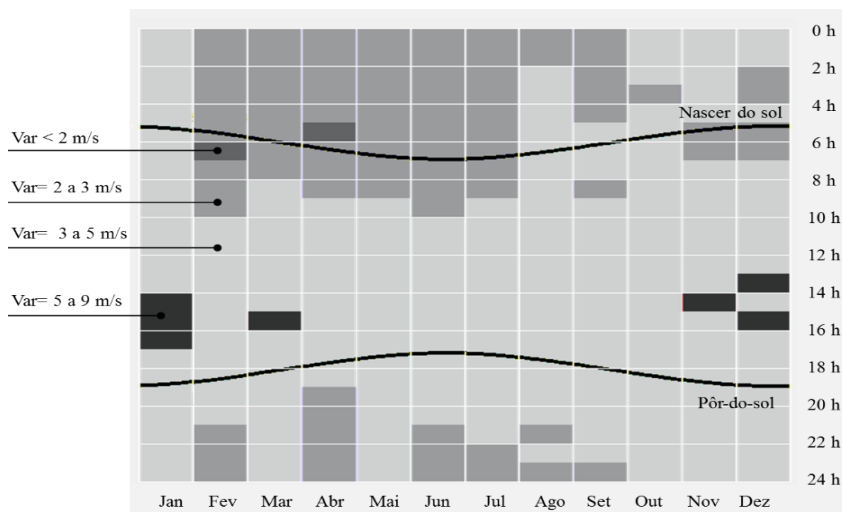


Figura 24. Velocidades predominantes dos ventos no verão, primavera e outono.



A Figura 25 apresenta o comportamento das velocidades do vento de acordo com a hora do dia. Observa-se que o período diurno registra faixas de velocidades do ar superiores ao período noturno. Enquanto o vento no período noturno varia de 2 à 3 m/s; o período diurno apresenta uma predominância de ventos na faixa de 3 à 5 m/s; podendo atingir de 5 à 9 m/s nos meses de novembro, dezembro, janeiro e março.

Figura 25. Velocidades predominantes dos ventos de acordo com a hora do dia.



3.1.2. Definição das condições de contorno

As simulações CFD representam o comportamento do fluido em regime estacionário. Para isto, é necessária a especificação das condições de contorno as quais tem-se o interesse em analisar. Este método de trabalho diferencia-se nos programas de simulação térmica em regime dinâmico que reproduzem as condições climáticas com intervalos horários por meio de arquivos representativos do clima de determinada cidade. Frequentemente utilizado, o arquivo do Ano Climático de Referência (Test Reference Year – TRY) contém os dados climáticos horários de um ano típico e sem extremos de temperatura.

A definição das condições de contorno das simulações caracteriza um dia típico de verão e um dia típico da meia estação em Florianópolis. Em função da temperatura do ar ser uma das variáveis mais influentes no conforto térmico dos ocupantes, a temperatura do ar média diurna foi o critério utilizados para a escolha dos dias típicos. Com base na análise climática, 25°C é a temperatura do ar mais frequente no verão e 20°C na meia estação.

Desta forma, foram considerados representativos dos períodos de verão e meia estação os dias 21 de janeiro e 5 de outubro, respectivamente. A Figura 26 e Figura 27 indicam a variação da temperatura de bulbo seco e velocidade do ar ao longo do dia 21 de janeiro e 05 de outubro. No dia 21 de janeiro, verifica-se uma variação de temperatura de 20,9 a 28,4°C, sendo 26,0°C a temperatura média diurna. A velocidade do ar varia de 2,4 a 7,6 m/s. No dia 05 de outubro a variação da temperatura é menor, sendo de 18,9 a 20,6°C com uma média de 19,8°C. Já a velocidade do ar apresenta maior variação, indo de 1,3 a 9,8 m/s.

Figura 26. TBS e velocidade do ar no dia 21 de janeiro.

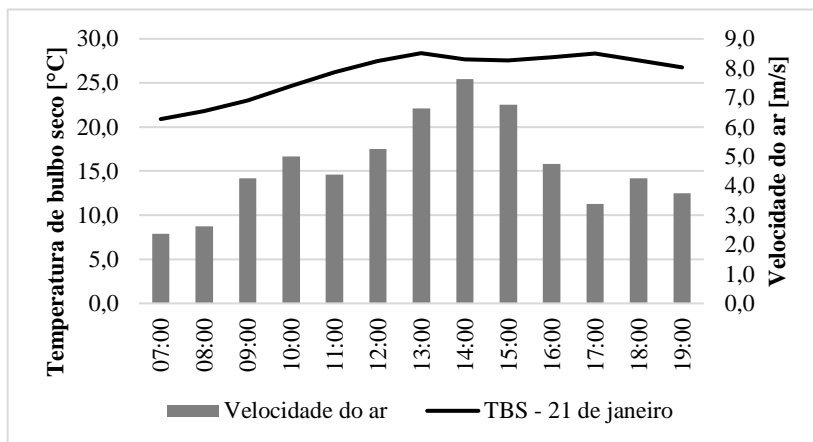
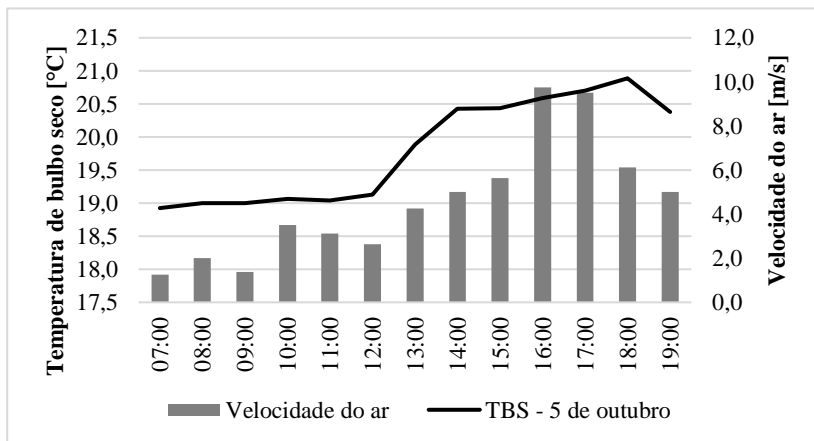
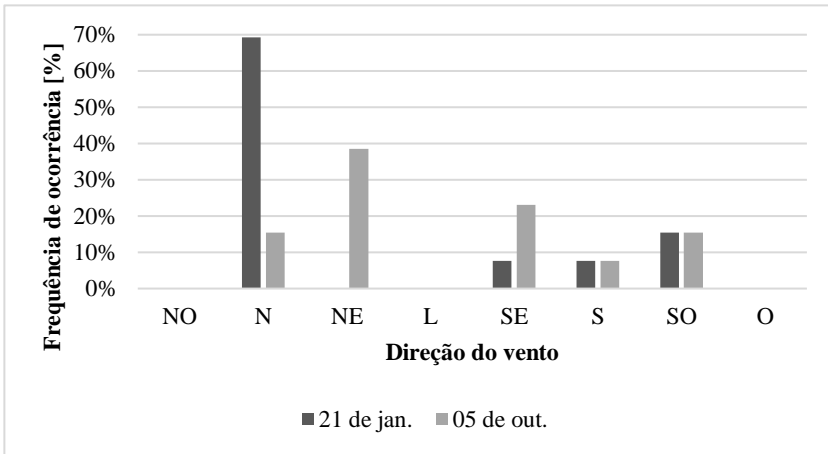


Figura 27. TBS e velocidade do ar no dia 05 de outubro.



O histograma de frequência de ocorrência da Figura 28 apresenta a predominância dos ventos por direção. Os ventos mais frequentes no dia 21 de janeiro e 05 de outubro são os ventos norte (69%) e nordeste (38%), respectivamente. O predomínio destas direções também condiz com a análise feita para todo o verão, primavera e outono.

Figura 28. Histograma de frequência de ocorrência dos ventos nos dias típicos dos períodos de verão e meia estação.



Com base nas análises climáticas, foram estabelecidas as condições de contorno para as simulações apresentadas pela Tabela 3. As direções do vento foram especificadas como norte e nordeste, que caracterizam o vento predominante de verão. As velocidades dos ventos são definidas em 1,0m/s; 3,0m/s e 6,0m/s de modo a explorar as velocidades mais frequentes dos ventos de verão. Desconsidera-se o fluxo de ar provocado pela infiltração.

Tabela 3. Condições de contorno.

Condições de contorno						
Período	Temp. do ar externo	Direção do Vento		Velocidades do ar		
Verão	25°C	Norte (90°)	Nordeste (45°)	1 m/s	3 m/s	6 m/s
Meia estação	20°C					

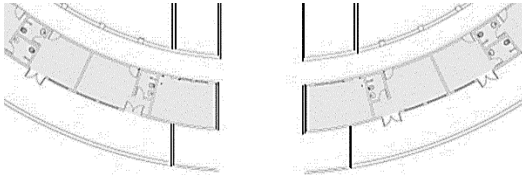


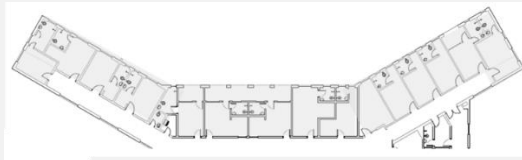
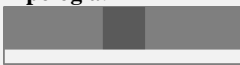

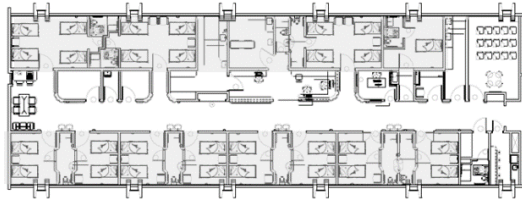


3.1.3.Caracterização dos ambientes de internação




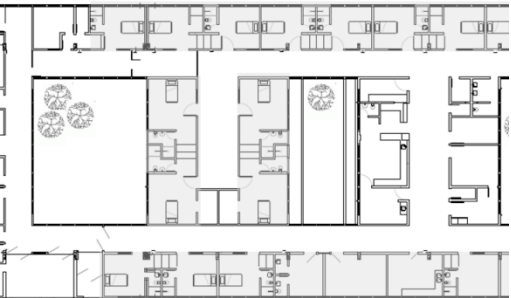
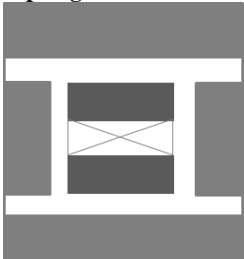

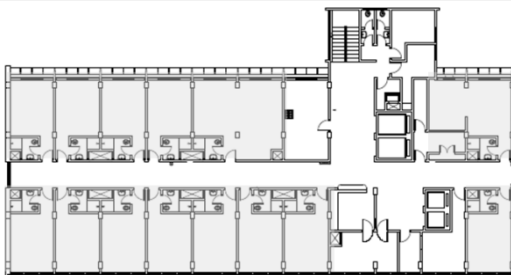


Os ambientes de internação foram caracterizados com base nos parâmetros estabelecidos pela normativa brasileira RDC50 (ANVISA, 2002) e pela coleta documental de hospitais da grande Florianópolis que oferecem atendimento em nível de internação, sendo eles: Hospital Nereu Ramos, Maternidade Carmela Dutra, Hospital Universitário Polydoro Ernani de São Thiago (HU/UFSC), Hospital Florianópolis, Hospital Infantil Joana de Gusmão, Hospital Celso Ramos e Unimed Litoral.

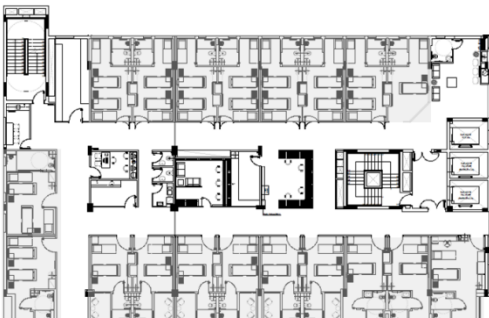


Conforme demonstra a Tabela 4, do total de sete hospitais ao qual teve-se acesso à documentação técnica, dois apresentam corredor simplesmente carregado, três com corredor duplamente carregado e dois corredor duplo com apoio central. Com relação às estratégias de ventilação natural, todos os hospitais adotam a estratégia de ventilação unilateral com uma janela voltada na fachada e uma porta no corredor, exceto o Hospital Infantil Joana de Gusmão que apresenta ventilação cruzada. Isto porque este hospital foi inaugurado em 1979 para ser especializado em tuberculose, tendo como premissa de projeto a diminuição do alto risco de infecção da doença. Para isto, o arquiteto Irineu Breitman criou pátios centrais que permitem a ventilação cruzada e ampliam a renovação do ar.

As configurações dos quartos de internação observaram variações de quartos privativos, semi-privativos e coletivos em uma mesma unidade de internação. No entanto, observa-se uma predominância dos quartos semi-privativos e da estratégia de ventilação unilateral. Além disso, a principal tipologia encontrada do setor de internação é o corredor simplesmente carregado com quartos de dois leitos.

Tabela 4. Tipologias arquitetônicas, tipos de quartos e estratégias de ventilação no setor de internação dos principais hospitais da grande Florianópolis (continua).

Planta baixa	Características
 <p data-bbox="123 550 341 582">Hospital Nereu Ramos</p>	<p data-bbox="672 311 778 335">Tipologia:</p>  <p data-bbox="672 422 767 446">Quartos:</p>  <p data-bbox="672 534 789 558">Ventilação:</p> <p data-bbox="672 558 767 582">Unilateral</p>
 <p data-bbox="123 869 392 893">Maternidade Carmela Dutra</p>	<p data-bbox="672 646 778 670">Tipologia:</p>  <p data-bbox="672 758 767 782">Quartos:</p>  <p data-bbox="672 869 789 893">Ventilação:</p> <p data-bbox="672 893 767 917">Unilateral</p>
 <p data-bbox="123 1260 644 1284">Hospital Universitário Polydoro Ernani de São Thiago</p>	<p data-bbox="672 989 778 1013">Tipologia:</p>  <p data-bbox="672 1141 767 1165">Quartos:</p>  <p data-bbox="672 1252 789 1276">Ventilação:</p> <p data-bbox="672 1276 767 1300">Unilateral</p>

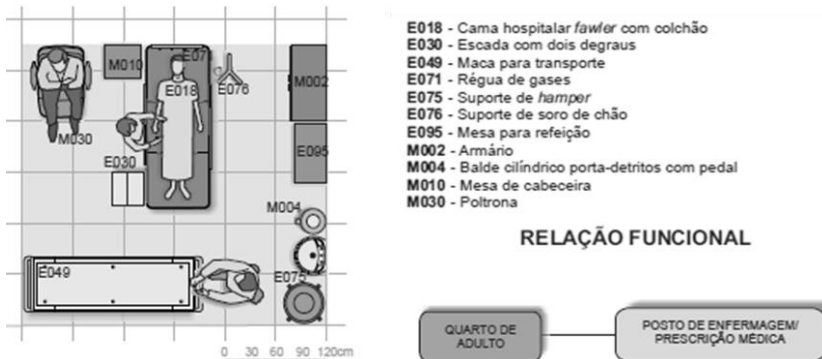
Planta baixa	Características
 <p data-bbox="199 507 418 539">Hospital Florianópolis</p>	<p data-bbox="748 236 855 264">Tipologia:</p>  <p data-bbox="748 389 844 418">Quartos:</p>  <p data-bbox="748 496 869 550">Ventilação: Unilateral</p>
 <p data-bbox="199 1011 362 1043">Hospital Infantil</p>	<p data-bbox="748 624 855 652">Tipologia:</p>  <p data-bbox="748 938 844 967">Quartos:</p>  <p data-bbox="748 1045 869 1099">Ventilação: Cruzada</p>
 <p data-bbox="199 1442 418 1474">Hospital Celso Ramos</p>	<p data-bbox="748 1161 855 1190">Tipologia:</p>  <p data-bbox="748 1315 844 1343">Quartos:</p>  <p data-bbox="748 1422 869 1476">Ventilação: Unilateral</p>

Planta baixa	Características
	<p>Tipologia:</p>  <p>Quartos:</p>  <p>Ventilação: Unilateral</p>

Unimed Litoral

De acordo com a Figura 29, os quartos costumam dispor de leitos para os pacientes, uma poltrona para acompanhantes e outros equipamentos, como: escada com dois degraus, mesa para refeição, entre outros. As dimensões do módulo é de 3,60x 3,60m por leito, sendo ampliado para 7,20 x 3,60m no caso de dois leitos. Sendo assim, a área útil das unidades de internação modeladas é de 25,92m². Destaca-se que esta área está bem acima do mínimo exigido pela RDC50 (ANVISA, 2002) que é subdimensionada em 14,00m². O pé direito considerado é de 3,20m de piso a piso, sendo descontado 0,60m da laje e do entre forro, a altura livre de piso à teto resulta em 2,80m.

Figura 29. Layout padrão do quarto de internação adulto.

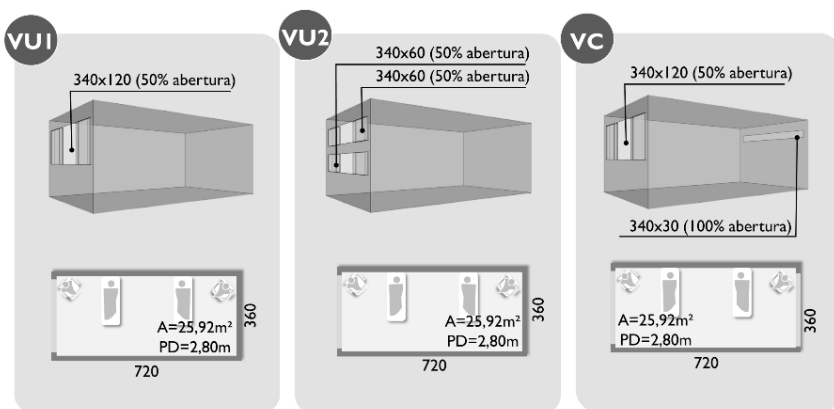


Fonte: BRASIL (2013).

A Figura 30 ilustra os quartos de internação simulados. A diferenciação entre eles é determinada exclusivamente pela estratégia de ventilação adotada, sendo eles: quarto com ventilação unilateral simples (VU1 - caso base), ventilação unilateral dupla (VU2) e ventilação cruzada (VC).

Todos os casos apresentam a mesma área mínima de abertura para iluminação e ventilação estabelecida pelo Código de Obras do município de Florianópolis. No caso de hospitais, a área de janela é de 1/6 da área total do ambiente com abertura de 50%. O quarto VU1 apresenta a configuração mais usual dos quartos de internação, sendo contemplado pela ventilação unilateral com uma única janela de correr de 3,40 x 1,20m, com 50% de abertura. O quarto VU2 também é definido pela ventilação unilateral, porém com duas janelas de correr de 3,40x 0,60m e 50% de abertura. Por fim, o quarto VC possui ventilação cruzada com uma abertura de entrada na fachada com 3,40x 1,20m e outra abertura de saída para o corredor representada pela bandeira da porta com 3,40 x 0,30m.

Figura 30. Quartos de internação investigados: quarto com ventilação unilateral simples (VU1), ventilação unilateral dupla (VU2) e ventilação cruzada (VC).



3.1.4.Determinação das cargas térmicas

A carga térmica do quarto é composta pelos usuários, iluminação artificial e o ganho de calor pela parede externa devido à radiação solar. Estes objetos são considerados uma fonte de energia por meio de um fluxo fixo de calor que pode ser especificado como um fluxo total para o objeto ou como um fluxo por unidade de área.

Os usuários do quarto consistem em dois pacientes e dois acompanhantes, totalizando quatro usuários com atividade metabólica de 60 W/m^2 (ASHRAE, 2009). O fluxo fixo de calor proveniente dos usuários foi calculado como o produto da atividade metabólica pela superfície corporal ($1,43\text{m}^2$). Sendo assim, para o fluxo fixo de calor para cada usuário é de 85W , totalizando 340W de carga térmica dos usuários.

A carga térmica de iluminação artificial se baseia nos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (INMETRO, 2010). Para que um hospital seja classificado como nível A, a densidade de potência de iluminação limite é de $13,0 \text{ W/m}^2$. Considerando que a área do quarto de internação é de $25,92\text{m}^2$, a carga térmica pela iluminação artificial resulta em 320W distribuídos por 5 luminárias com duas lâmpadas de 32W cada.

Para a modelagem da ventilação natural foi considerado que o quarto de internação se localiza em um pavimento médio e voltado para a orientação norte com o intuito de buscar o melhor aproveitamento dos ventos predominantes em Florianópolis. Apenas uma parede está em contato com o meio externo. As demais superfícies adjacentes à parede externa são consideradas adiabáticas. Para contemplar o efeito da radiação solar, o software CFD utilizado (Phoenics) requer informações sobre o fluxo fixo de calor pelas paredes que não são consideradas adiabáticas. O fluxo fixo de calor é calculado de acordo com a equação 3 para a parede externa e com a equação 4 para as janelas.

$$Q=U \cdot ((\alpha \cdot I \cdot R_{se}) + T_{ext} - T_{int}) \quad (2)$$

$$Q=U \cdot (T_{ext} - T_{int}) + F_s \cdot I \quad (3)$$

Onde, Q: fluxo de calor (W/m^2), U: transmitância térmica ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), α : absortividade da superfície, I: radiação solar incidente (W/m^2), R_{se} : resistência superficial, T_{ext} : temperatura externa (K) e T_{int} : temperatura interna (K). Fonte: Lamberts et al. (2012).

Os dados para o cálculo do fluxo fixo de calor na parede externa e janelas são apresentadas pela Tabela 5. A janela recebe vidro incolor simples e a parede possui 14cm de espessura, sendo construída em alvenaria de tijolos 6 furos com reboco em argamassa e pintura branca.

Tabela 5. Cálculo do fluxo fixo de calor.

U _{parede} [W/(m ² .K)]	U _{vidro} [W/(m ² .K)]	α	FS	R _{se}	ΔT	I _{verão} [W/m ²]	I _{meia estação} [W/m ²]
2,48	5,70	0,20	0,88	0,04	0,80	291	377

Q parede no verão = **7,76 W/m²**

Q vidro no verão = **260,64 W/m²**

Q parede na meia estação = **9,46 W/m²**

Q vidro na meia estação = **336,32 W/m²**

A radiação solar incidente foi obtida pelo software Radiasol desenvolvido em 2001 pelo laboratório de energia solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Foi adotado o valor da radiação solar média na fachada norte durante o horário mais crítico. Nos períodos de verão e meia estação, os valores se referem à radiação solar média para o mês de janeiro e outubro às 12hs, respectivamente.

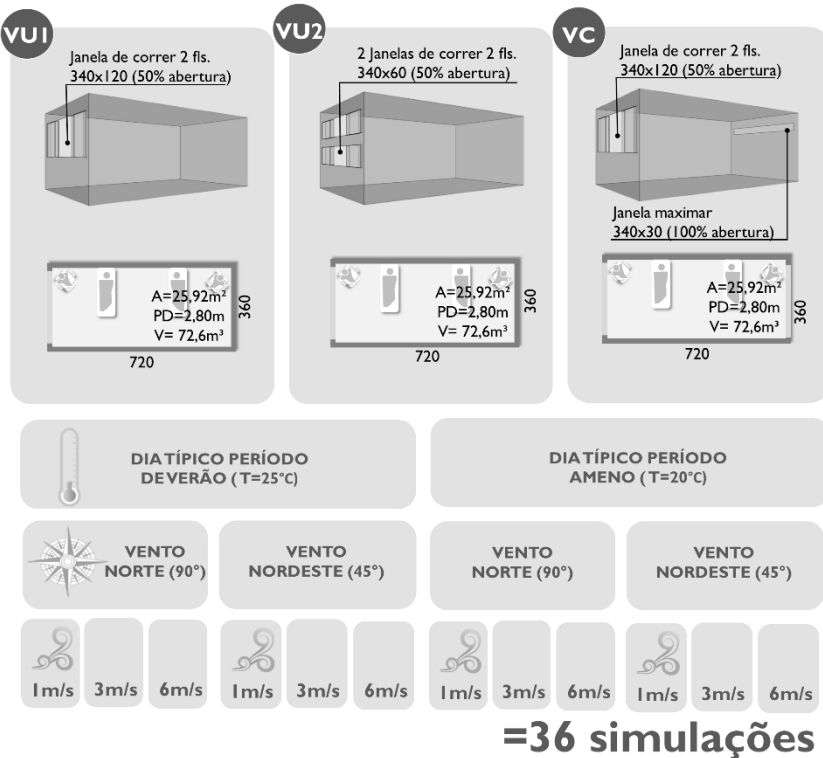
A diferença de temperatura entre o ambiente externo e interno foi estimada por meio da tabela (ANEXO A) desenvolvida pelo professor Eduardo M. González (2013), denominada *Cálculo de la Temperatura Media Interior em Región Caliente*. Este cálculo é simplificado e utiliza os seguintes dados: temperatura do ar externo, oscilação da temperatura do ar externo, dimensões do ambiente, área de janela, propriedade térmicas da envoltória, radiação solar média diária do mês analisado, cargas térmicas (iluminação e ocupação) e trocas de ar por hora mínima estimada.

3.1.5. Casos de estudo

A definição dos casos de estudo anteriormente descrita procurou explorar a realidade dos ambientes de internação em Florianópolis. Este contexto engloba as características climáticas e a os aspectos arquitetônicos relevantes para o aproveitamento da ventilação natural como estratégia bioclimática. A Figura 31 apresenta a síntese dos parâmetros variáveis das simulações CFD, tendo sido explorados

três estratégias de ventilação: ventilação unilateral simples (VU1), ventilação unilateral dupla (VU2) e ventilação cruzada (VC).

Figura 31. Parâmetros variáveis das simulações CFD.



3.2.ETAPA 2: MODELAGEM CFD

A modelagem no software CFD partiu do caso base, definido como o quarto com ventilação unilateral simples (VU1). O software utilizado é o PHOENICS, desenvolvido pela empresa britânica CHAM (ConcentrationHeatand Momentum Limited). Fundada em 1974 pelo Professor Brian Spalding, a empresa é especializada em simulação de fluxo de fluídos e de processos de trocas de calor aplicados à equipamentos de engenharia e espaços construídos.

Para este último, o PHOENICS dispõe do módulo FLAIR que possui uma interface mais amigável para a visualização, avaliação e

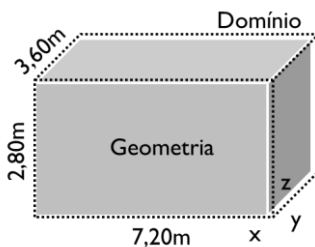
refinamento do fluxo de ar na malha urbano ou no interior das edificações. O maior avanço deste módulo é a facilidade na representação e construção da geometria do modelo de estudo em três dimensões. O processo de modelagem CFD do presente trabalho foi dividido em: definição do domínio e malha de avaliação, determinação do número de iterações e construção da geometria.

3.2.1. Domínio e malha de avaliação

A definição do domínio é feita pelo seu dimensionamento e especificação das suas propriedades. Conforme indica a Figura 32, o domínio do modelo foi dimensionado para abranger a área de interesse do estudo. Previamente, foram feitos testes com o domínio maior que a geometria, porém o aumento do volume do domínio implica em um tempo maior de simulação. Como o foco do trabalho é o ambiente interno, optou-se por trabalhar com o domínio sendo o próprio ambiente.

As condições de contorno iniciais são especificadas nas propriedades do domínio. O modelo de turbulência adotado foi o LVEL por ser o modelo mais adequado quando a simulação envolve o fluxo de ar e de transferência de calor, simultaneamente (CHAM, 2008).

Figura 32. Definição do tamanho do domínio.

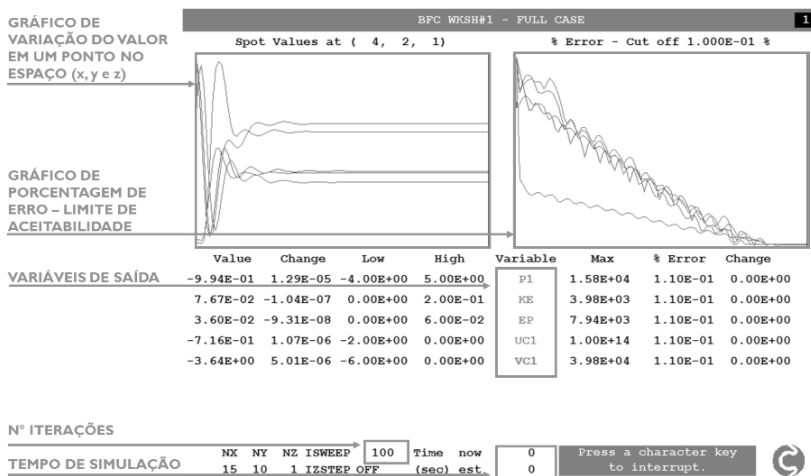


A malha de avaliação é responsável por capturar os diversos elementos construtivos que interferem no fluxo de ar. Tendo como base o domínio e a geometria criada, o programa gera uma malha padrão. Neste caso houve a necessidade de refinamento da malha para possibilitar a identificação apurada de todos os objetos, resultando em uma malha de distribuição homogênea com células de 0,1 x 0,1 x 0,1m.

3.2.2. Número de iterações

A ponderação entre a precisão dos resultados e o tempo de simulação determinou o número de iterações. O programa exibe gráficos de convergência os quais apontam, ao longo do processo de simulação, os erros e a precisão dos resultados (Figura 33).

Figura 33. Gráficos de convergência



Fonte: SAFE SOLUTION, 2015.

O número mínimo iterações ideal é aquele no qual os valores de todas as variáveis em todas as células do domínio variam num nível considerado aceitável. Na prática, isso significa que atingido esse número mínimo, as iterações posteriores irão acarretar mudanças insignificantes nos valores das variáveis, ou seja, a simulação terá convergido. Quando isso ocorre, idealmente todas as curvas do gráfico *spot values* se tornam paralelas ao eixo horizontal, podendo oscilar com uma amplitude reduzida. Esse comportamento indica que os valores das variáveis em um ponto no espaço não estão mais variando significativamente.

Por outro lado, no gráfico percentual de erro, idealmente todas as curvas iniciam com um erro alto e se estabilizam num patamar de variação percentual baixo. Esta variação deve estar abaixo do limite de aceitabilidade estabelecido de 0,1% de erro no valor das variáveis.

Após simulações prévias, observou-se a convergência dos resultados para 5000 iterações. Sendo assim, foram realizadas 36 simulações em computadores com processador Intel Core i5-2400, resultando em um tempo médio de 03 horas por simulação.

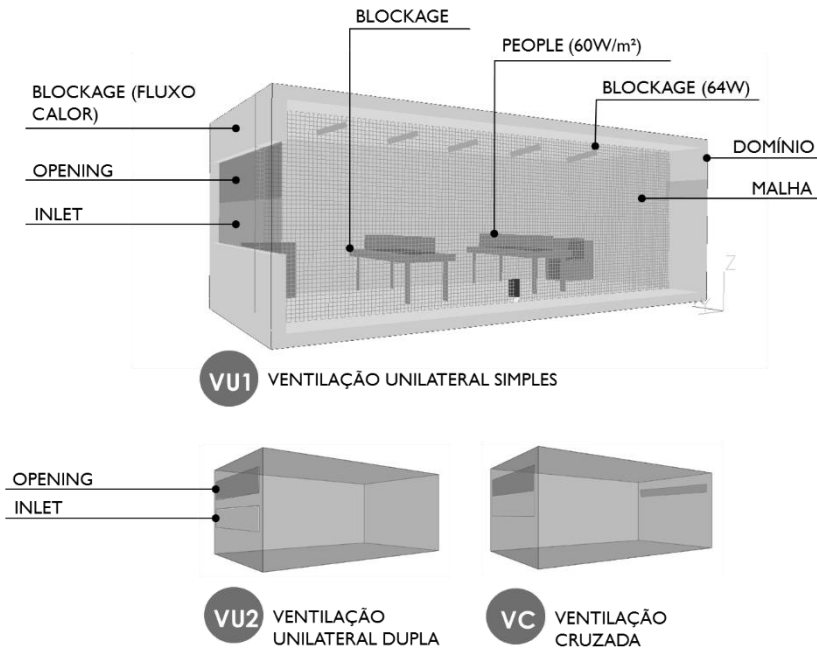
3.2.3. Construção da geometria

O módulo FLAIR permite a modelagem da geometria ou a importação de arquivos de outros programas. O arquivo deve ser importado em formato *.stl* que, automaticamente, é convertido para o formato *.dat* pelo PHOENICS. Por tratar-se de uma geometria simples, a envoltória, mobiliário e usuários do quarto de internação foram modelados dentro do próprio FLAIR.

O programa disponibiliza uma biblioteca própria de materiais para serem aplicados aos elementos modelados. No entanto, é necessário conhecimento em linguagem de programação computacional para a inserção de novos materiais aos arquivos base. Por este motivo, foram aplicados os materiais existentes na biblioteca do programa. As propriedades térmicas destes materiais podem ser editadas e permitem maior aproximação com a realidade dos objetos de estudo.

Para que o modelo CFD execute simulações nas quais o domínio é o próprio ambiente interno, é necessário a indicação de aberturas de entrada e saída de ar. Conforme ilustra a Figura 34, as janelas foram modeladas como objetos INLET responsável pela entrada de ar e OPENING que admite tanto o ingresso quanto a saída de ar, dependendo das pressões geradas no ambiente externo e interno (CHAM, 2008). O objeto INLET permite atribuir uma temperatura inicial ao fluxo de vento, neste caso, igual à temperatura exterior dos contextos, e uma velocidade do vento em um dos vários eixos principais (x, y e z). No eixo y e x, foram definidas as velocidades do vento, de acordo com cada caso (1,0; 3,0 ou 6,0 m/s), como componente negativo para indicar sua proveniência do norte e nordeste. O componente positivo representaria o vento sul e suas variações.

Figura 34. Geometria dos quartos.



A configuração do objeto INLET na parte inferior da abertura e o objeto OPENING na parte superior considera o efeito conjunto da ação do vento e da diferença de temperatura (efeito chaminé). Conforme dito anteriormente, estudos indicam que o fluxo de ar entra pela porção inferior da abertura e sai pela porção superior sob a ação do efeito conjunto (ALLOCCA et al., 2003; STABAT et al., 2012). Nesta situação, o fluxo de ar é invertido na altura do NPL (neutral pressure level). Segundo Stabat et al. (2012), a altura do NPL depende da distribuição e características das aberturas. Para simplificar a modelagem, o NPL foi localizado no meio da janela, dividindo a abertura em duas (INLET e OPENING). Ressalta-se que o quarto com ventilação cruzada, a abertura oposta funciona como um campo aberto, sem considerar a interferência de um corredor de circulação.

As aberturas de uma edificação apresentam uma característica denominada coeficiente de descarga. Este, é expressado em uma razão que “contabiliza as perdas na energia cinética do escoamento, após o mesmo passar através das aberturas localizadas nas paredes externas e

internas de uma edificação” (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010). Estas perdas variam de acordo com o tipo de janela. No entanto, uma vez que o objetivo deste estudo não é avaliar o tipo de janela, as aberturas de ventilação foram avaliadas como vãos livres, assumindo-se um coeficiente de descarga de 1,0.

Com exceção dos usuários, todos os demais elementos que compõe o quarto de internação são denominados BLOCKAGES. Cada objeto BLOCKAGE constitui-se em um volume sólido com materiais a definir. As paredes, piso e cobertura adotaram o material Solid with Smooth-Wall Friction. No caso das paredes externas consideradas com fontes de energia pela troca de calor com o ambiente externo, foram inseridos os valores do fluxo fixo de calor e a transmitância térmica.

O material dos leitos dos pacientes e poltronas dos acompanhantes foram definidos como *material similar to steele timber flooring/woodblock*, respectivamente. As luminárias foram especificadas em *aluminium* com 64W de potência cada, considerando o cálculo anterior de carga térmica para iluminação.

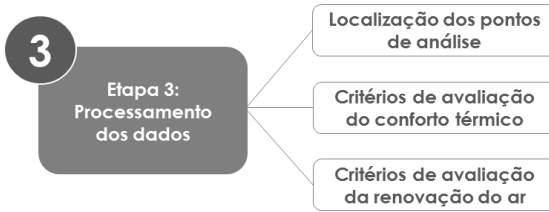
Além disso, os usuários foram inseridos como objeto PEOPLE, o qual não impede o fluxo do ar (CHAM, 2008) e funciona como uma fonte de calor de 60W/m², representando uma pessoa quieta sentada (LAMBERTS et al., 2013).

3.3.ETAPA 3: PROCESSAMENTO DOS DADOS

Diversas informações são originadas sobre as condições ambientais resultantes da interação do fluxo de ar na edificação. Os fluxos de ar apresentam comportamentos distintos em cada ponto do ambiente e influenciam nas velocidades do ar, temperaturas do ar, intensidades de turbulências, renovações do ar, trocas de calor, entre outros. As simulações CFD possibilitam a obtenção dessas diversas variáveis para cada ponto no espaço.

Conforme ilustra a Figura 35, com o intuito de compreender os efeitos produzidos pela ventilação natural no quarto de internação e seu reflexo sobre os usuários, o processamento de dados foi dividido nas seguintes etapas: localização dos pontos no espaço, critérios de avaliação do conforto térmico e critérios de avaliação da renovação do ar.

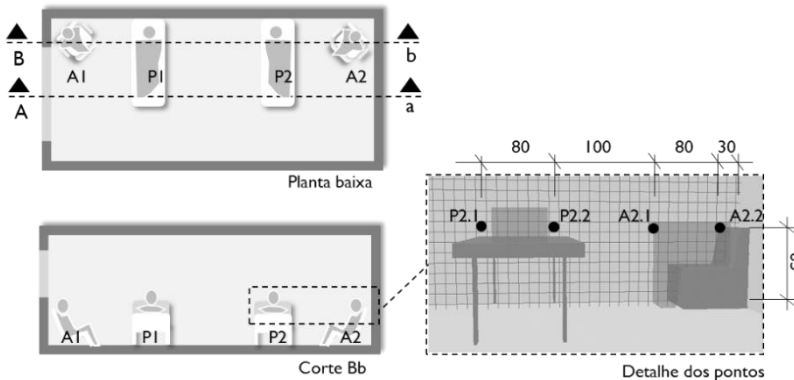
Figura 35. Etapas do processamento de dados.



3.3.1. Localização dos pontos de análise

A Figura 36 apresenta a localização dos pontos de análises do quarto de internação. Foram estabelecidas três secções de análise, sendo uma horizontal e duas verticais. A secção horizontal é apresentada pela planta baixa a uma altura de 85 cm em relação ao piso, que se refere altura padrão de um leito hospitalar e, conseqüentemente a altura aproximada da cabeça dos acompanhantes que é uma das partes mais sensíveis do corpo às variações de temperatura (UĞURSAL; CULP, 2013).

Figura 36. Localização dos pontos de análise.



As secções verticais são representadas pelos cortes AA e BB. O corte AA é feito no meio do quarto de internação de modo a permitir a visualização do fluxo de ar desde sua entrada até a saída do ambiente. Por outro lado, a análise da interação do fluxo de ar sobre o corpo dos usuários é feita a partir do corte BB. Para representar os acompanhantes 1 e 2 e

pacientes 1 e 2, foram estabelecidos os pontos A1, P1, P2 e A2. Conforme ilustra o detalhe da Figura 36, cada usuário possui um ponto no lado esquerdo e outro no lado direito em função das diferenças observadas entre as superfícies do corpo à barlavento (direito) e sotavento (esquerdo). A média aritmética entre estes subpontos, resulta no valor adotado para as análises de conforto térmico e renovação do ar.

3.3.2. Critérios de avaliação do conforto térmico

Para verificação da aplicabilidade das estratégias de ventilação natural em quartos de internação na cidade de Florianópolis, faz-se necessária a avaliação do conforto térmico para cada usuário em dias típicos de verão e meia estação. A condição de conforto térmico tem como critério de avaliação o modelo adaptativo ASHRAE Standard 55 (2013).

A abordagem adaptativa considera que as condições climáticas nas quais o indivíduo esteve exposto nos últimos dias influenciam seu comportamento de adaptação ao ambiente térmico (DE DEAR et al., 2002). Desta forma, o conforto térmico depende da temperatura operativa e da temperatura média predominante do ar externo baseada, no mínimo, nos sete últimos dias antes do dia em questão (ASHRAE STANDARD 55 (2013)).

Considerando os dias típicos adotados para o verão e meia estação, a temperatura média predominante do ar externo foi calculada pela média aritmética das temperaturas médias para os últimos sete dias anteriores ($T_{od-1}, T_{od-2}, \dots$) aos dias 21 de janeiro e 05 de outubro. O cálculo feito com base na equação 5 resulta em uma temperatura média predominante de 23,1°C para o verão e 16,8°C para a meia estação.

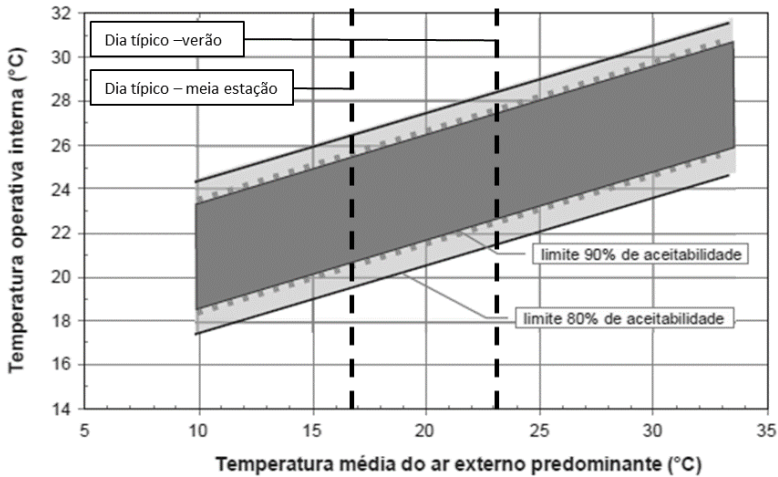
$$T_{mpa} = 0,34T_{od-1} + 0,23T_{od-2} + 0,16T_{od-3} + 0,11T_{od-4} + 0,08T_{od-5} + 0,05T_{od-6} + 0,03T_{od-7} \quad (5)$$

Onde, $T_{mpa}(ext)$: temperatura média predominante do ar externo (°C), T_{od-1} : temperatura média do dia anterior (°C), T_{od-2} : temperatura média um dia antes do anterior, T_{od-3} : temperatura média dois dias antes do anterior, e assim por diante.

Com base nos valores calculados para as temperaturas médias predominantes do ar externo, modificou-se o gráfico de faixas de temperaturas operativas aceitáveis para espaços naturalmente ventilados (Figura 37) de forma a considerar a temperatura média predominante

constante, somente variando as temperaturas operativas que foram obtidas pelas simulações.

Figura 37 – Faixas de temperaturas operativas aceitáveis para espaços naturalmente ventilados. Linha tracejada indica as temperaturas médias predominantes calculadas para os dias típicos de verão e meia estação.



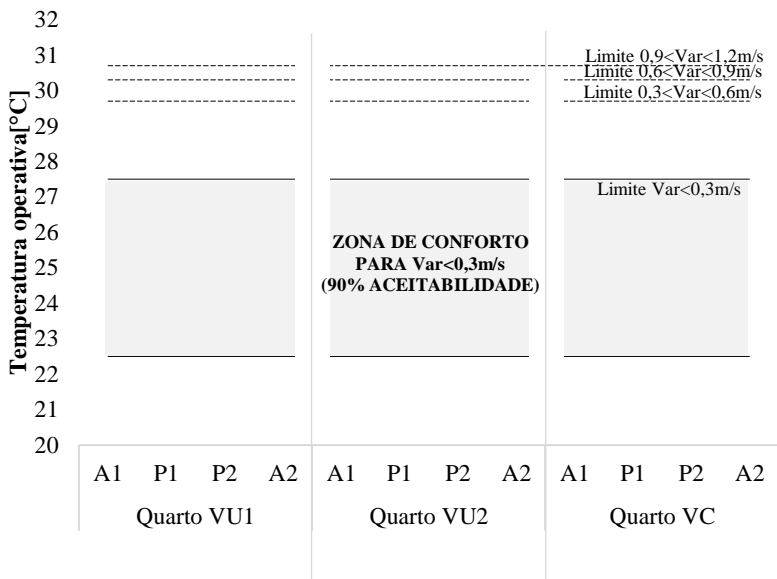
Fonte: BERKLEY COMFORT TOOL. Adaptado pelo autor.

Mediante isto, a Figura 38 exemplifica o gráfico base para análise do conforto adaptativo para cada quarto (VU1, VU2 e VC) e usuários (acompanhantes 1 e 2, pacientes 1 e 2) em um dia típico de verão. Uma vez que ambientes com temperatura operativa superior a 25°C podem ter os limites da zona de conforto ampliados quando sujeito a velocidade do ar acima de 0,3m/s, foram consideradas as correções do limite superior da zona de conforto para velocidades do ar de 0,3 a 0,6m/s; 0,6 a 0,9m/s e 0,9 a 1,2m/s. A ASHRAE Standard 55 (2013) prevê um aumento no limite superior da temperatura operativa de conforto de 1,2°C; 1,8°C e 2,2°C; respectivamente.

Enquanto os limites corrigidos por velocidades do ar elevadas são indicados por linhas tracejadas, os limites superior e inferior para velocidades do ar abaixo de 0,3m/s são representados por linhas contínuas. Todos estes limites preveem uma aceitabilidade de 90% dos usuários do ambiente. Para Brager et al. (1993), “aceitabilidade” é o termo

mais amplo e adequado para referenciar a aprovação dos indivíduos quanto a condição do ambiente térmico.

Figura 38 – Gráfico base para análise do conforto térmico em um dia típico de verão.



A abordagem adaptativa utiliza a temperatura operativa para se aproximar à sensação térmica pelo fato desta ser influenciada pela temperatura do ar, velocidade do ar e temperatura radiante média. O cálculo desta variável pelo software PHOENICS é baseado na equação 5.

$$T_o = \frac{T_{rad} + T_a \times (10 \times V)^{0,5}}{1 + (10 \times V)^{0,5}} \quad (4)$$

Onde, T_o : temperatura operativa (°C), T_{rad} : temperatura radiante média (°C), T_a : temperatura do ar interno (°C) e V : velocidade média do ar interno (m/s).

3.3.3. Critérios de avaliação da renovação do ar

Para analisar a renovação do ar forma definidos três níveis de valores encontrados como recomendação nas normas pesquisadas: nível baixo, médio e alto. Conforme indica a Tabela 6, enquanto as taxas de

renovação do ar são estabelecidas por paciente no guia da OMS (2009), STANDARD 170 (ASHRAE, 2013) e na RE n°09 (ANVISA, 2003); na NBR 7256 (ABNT, 2005) este valor é determinado por m² de piso.

Tabela 6 – Recomendações para taxa mínima de renovação do ar.

Classificação	Normativas (*)	Taxa mínima de renovação do ar	
		Conforme normativa	Conforme calculado
Nível baixo	-OMS (2009) -STANDARD 170 (ASHRAE, 2013)	0,08m ³ /s/paciente	0,16m ³ /s
Nível médio	-NBR 7256 (ABNT, 2005)	0,01m ³ /s/m ²	0,25m ³ /s
Nível alto	-RE n°09 (ANVISA, 2003)	0,45m ³ /s/paciente	0,90m ³ /s

(*) Com exceção da OMS (2009), as demais normativas são destinadas a ambientes climatizados.

O guia da OMS (2009) e a STANDARD 170 (ASHRAE, 2013) são direcionados para áreas não críticas do hospital, como é o caso do quarto de internação geral. Sabe-se que situações de internação por doenças infectocontagiosas podem tornar estas áreas críticas. Nestes casos, o quarto deve atender à NBR7256 (ABNT, 2005). Esta normativa preza por um maior controle das condições térmicas e de qualidade do ar destes espaços devido ao risco maior de infecção hospitalar.

0Apesar disto, a taxa mínima de renovação do ar estabelecida pela RE n°09 (ANVISA, 2003) que se destina a áreas de uso coletivo é maior do que a NBR 7256 (ABNT, 2005), aplicada a áreas críticas. Com o intuito de avaliar o grau de exigência da RE n°09 (ANVISA, 2003), a análise da renovação do ar contempla o valor recomendado por esta resolução.

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados deste trabalho obtidos a partir da simulação CFD dos modelos descritos anteriormente. Em primeiro lugar, é analisado o desempenho da ventilação natural nos quartos de internação, sendo discutidos os efeitos produzidos pelas diferentes direções dos ventos e configurações das aberturas. A seguir, são feitas análises com foco nos usuários. Para cada usuário é discutida a condição de conforto térmico tendo como critério de avaliação o modelo adaptativo ASHRAE Standard 55 (2013). As condições de renovação do ar também são consideradas e apresentam como critério de avaliação a ASHRAE Standard 170 (2013), o guia da OMS (2009), NBR 7256 (ABNT, 2005) e RE n°09 (ANVISA, 2003).

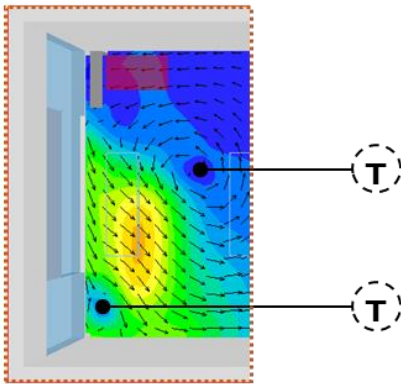
4.1.DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL

O desempenho da ventilação natural nos diferentes quartos de internação é analisado a partir dos efeitos produzidos pelas diferentes direções dos ventos e estratégias adotadas: quartos com ventilação unilateral simples (VU1), dupla (VU2) e ventilação cruzada. A análise é feita para o comportamento do fluxo de ar em cada caso submetidos aos ventos predominantes norte e nordeste.

4.1.1.Comportamento do fluxo de ar (turbulento ou laminar)

O comportamento do fluxo de ar é determinante para o desempenho da ventilação. Este comportamento pode ser turbulento ou laminar, dependendo da intensidade de mudança de direção do fluxo de ar (BITTENCOURT et al., 2006). Denominam-se área de turbulência os locais onde há o encontro de fluxos de ar de diferentes direções. Estas áreas, detalhadas pela Figura 39, ocorrem com diferentes frequências nos casos simulados.

Figura 39 – Planta baixa com detalhe das áreas de turbulência.



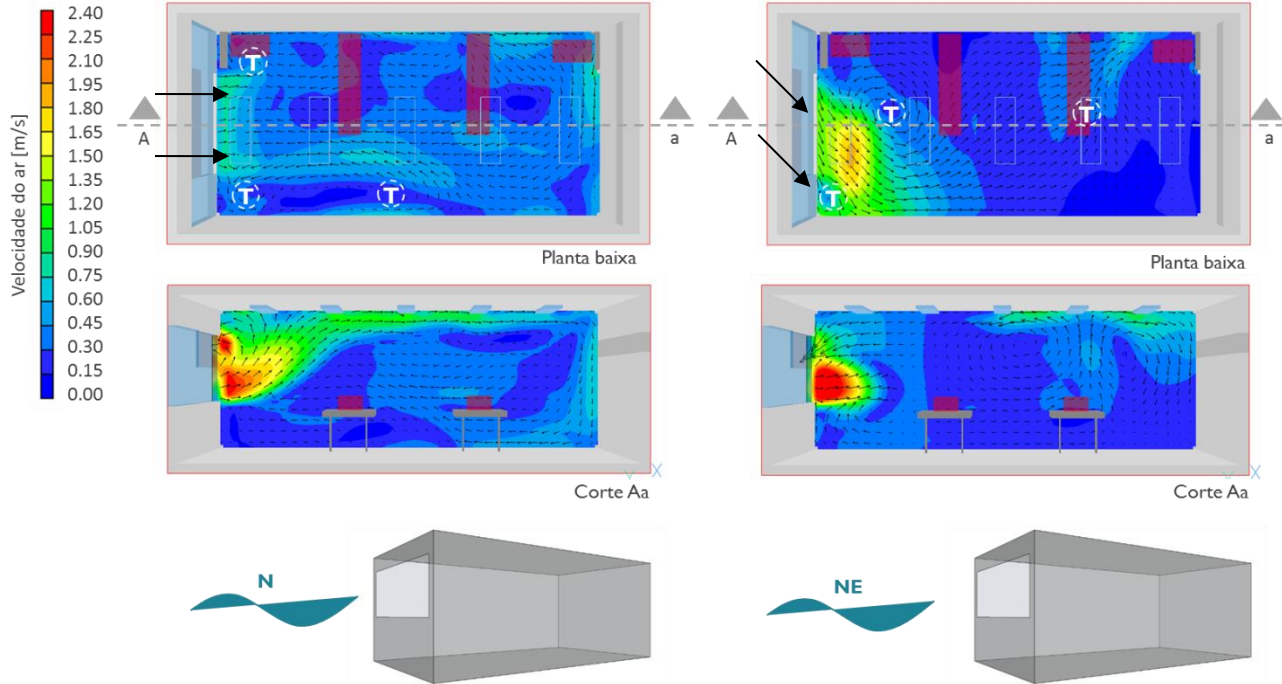
Detalhe Planta baixa - Áreas de Turbulência

A Figura 40 apresenta o comportamento do fluxo de ar no quarto de internação com ventilação unilateral simples (VU1) a 3m/s. As plantas baixas apontam áreas de turbulências (T) próximas ao acompanhante 1 com o vento norte e paciente 2 com o vento nordeste. Estudos demonstraram que o fluxo de ar turbulento apresenta maior efeito de resfriamento e aumenta a sensibilidade ao desconforto localizado se comparado ao fluxo de ar laminar (BITTENCOURT et al., 2006). Desta forma, estes usuários estão mais sujeitos ao desconforto localizado pela corrente de ar.

Observa-se nos cortes apresentados pela Figura 40 que o fluxo de ar tende a ser laminar quando há incidência do vento norte. Por outro lado, com o vento nordeste, o comportamento do ar se modifica, resultando em um fluxo de ar ascendente sobre o paciente 2. Este efeito ocorre pelo fato do ar no entorno do paciente 2 ser aquecido a ponto de se expandir, fazendo com que o ar menos denso suba.

Outro comportamento notável é a inversão da direção do fluxo de ar na altura dos usuários para os ventos norte e nordeste. Enquanto com o vento norte o fluxo do ar sobre os usuários é da direita para a esquerda (contrário à entrada do ar), com o vento nordeste o fluxo é da esquerda para a direita (a favor da entrada do ar). A direção contrária à entrada do ar para o vento norte deve-se ao fluxo ascendente que ocorre próximo à janela. Ao entrar no quarto, o vento norte logo sobe e continua seu percurso junto ao teto. Assim, observa-se o fluxo de ar de saída na altura dos usuários.

Figura 40 – Comportamento da ventilação unilateral simples (VU1) com vento norte (à esq.) e nordeste (à dir.) a 3m/s.

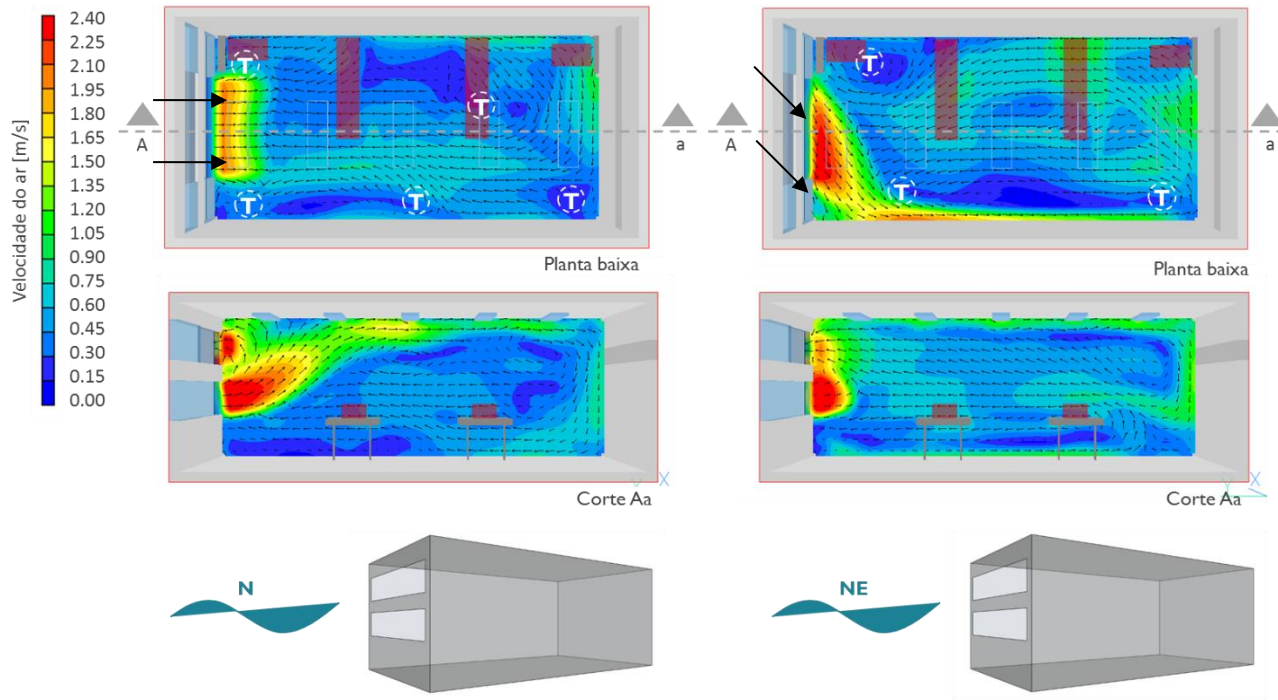


O mesmo não ocorre para o quarto de internação com ventilação unilateral dupla (VU2). Conforme pode ser verificado na Figura 43, a direção do movimento do ar na altura dos usuários é contrária ao fluxo de ar de entrada para ambos os ventos. Além disso, o comportamento do vento nordeste tende a ser mais parecido com o vento norte, onde ar que entra logo sobe e continua seu percurso junto ao teto, resultando no fluxo de ar de saída na altura dos usuários.

Novamente, as plantas baixas indicam áreas de turbulências (T) próximas a janela com influência direta sobre o acompanhante 1. Observa-se também uma área de turbulência sobre o paciente 2 para o vento norte. Esta condição pode ser vantajosa em situações de temperaturas do ar elevadas, porém torna o acompanhante 1 e paciente 2 mais sensíveis ao desconforto localizados e comparado com os demais usuários (FANGER; CHRISTENSEN, 1986).

As simulações CFD revelam ainda maiores velocidades do ar interno do quarto com ventilação unilateral dupla (Figura 43) em relação ao quarto com ventilação unilateral simples (Figura 40).

Figura 41 – Comportamento da ventilação unilateral dupla (VU2) com vento norte (à esq.) e nordeste (à dir.) a 3m/s.

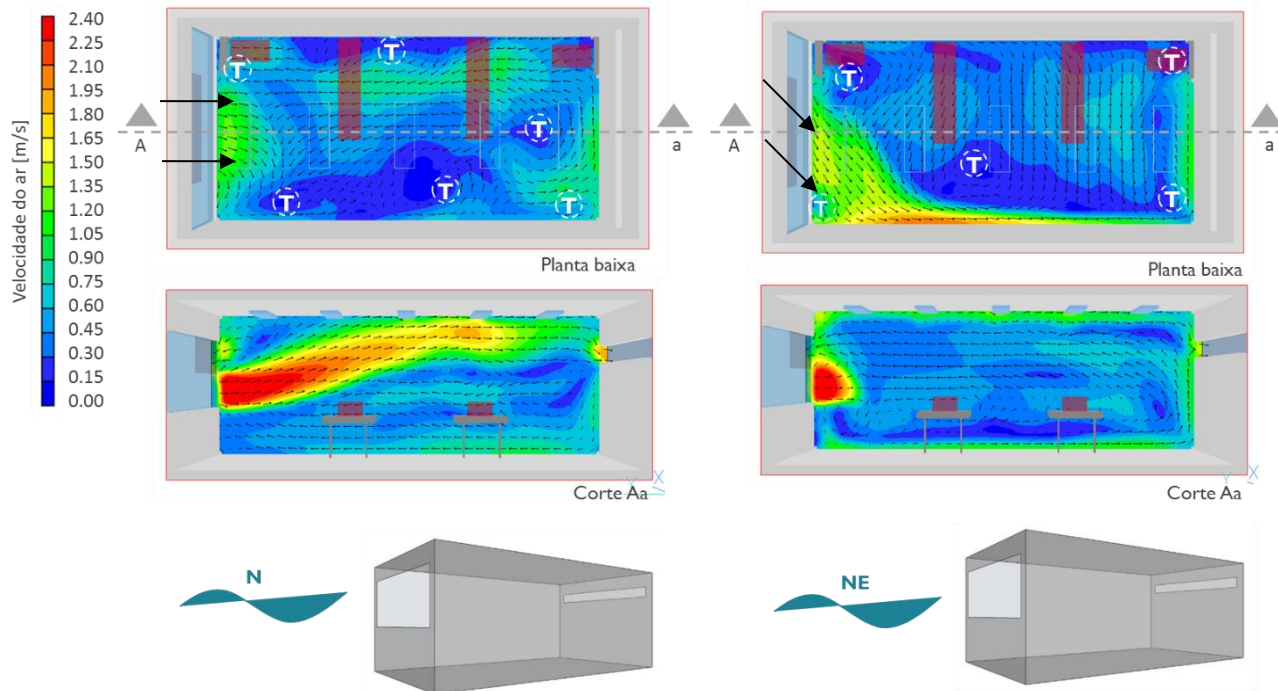


O comportamento do fluxo de ar no quarto de internação com ventilação cruzada (VC) é apresentado pela Figura 42. Observa-se que, a adoção da ventilação cruzada intensifica a ocorrência de áreas de turbulência (T). As plantas baixas indicam áreas de turbulência próximas à janela, à parede oeste e nos fundos do quarto. Para Bittencourt et al. (2006), o fluxo de ar turbulento aumenta o potencial de trocas de calor por convecção quando comparado ao fluxo de ar laminar.

Os cortes indicam que, com o vento norte, o ar penetra na edificação perpendicularmente tanto à abertura de entrada quanto à de saída do ar, resultando fluxo de ar bem definido que cruza o quarto de internação. Assim como nos quartos VU1 e VU2, o fluxo de ar de entrada ocorre acima da altura da zona ocupada pelos usuários, resultando em um fluxo de ar contrário à janela (da direita para a esquerda) sobre os pacientes e acompanhantes.

O vento nordeste no quarto com ventilação cruzada apresenta um comportamento diferente. Conforme observa-se no corte, o vento nordeste não cruza o quarto de internação de maneira bem definida. Neste caso, o ar entra a 45° e atinge a parede oeste antes de encontrar a abertura de saída, resultando em velocidades do ar menores sobre os usuários. A discussão sobre a influência da estratégia de ventilação e direção do vento sobre a velocidade do ar interno é apresentada a seguir.

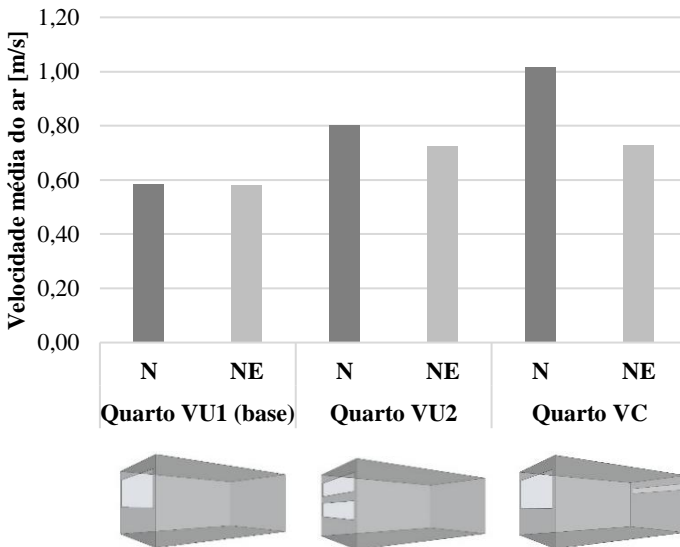
Figura 42 – Comportamento da ventilação cruzada (VC) com vento norte (à esq.) e nordeste (à dir.) a 3m/s.



4.1.2. Influência da estratégia de ventilação e da direção do vento sobre a velocidade do ar interno

Os resultados obtidos com as simulações permitiram analisar a influência da estratégia de ventilação e da direção do vento sobre a velocidade do ar interno. A Figura 43 indica as velocidades médias do ar interno para os diferentes quartos expostos ao vento norte e nordeste de 1 à 6m/s. O gráfico aponta a variação da velocidade média do ar no interior do quarto de internação foi de 0,58 m/s a 1,02 m/s.

Figura 43 – Velocidade média do ar interno para os quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada) com vento norte e nordeste de 1 à 6m/s.



As maiores velocidades médias do ar interno ocorrem com a adoção da ventilação cruzada (VC), sendo 1,02m/s e 0,73m/s para os ventos norte e nordeste, respectivamente. Em seguida aparece a ventilação unilateral dupla (VU2), resultando em velocidade médias de 0,80 m/s para o vento norte e 0,73 m/s para o vento nordeste. O quarto em que ventilação unilateral ocorre através de apenas uma janela (VU1)

apresenta as menores velocidades do ar, sendo 0,59m/s e 0,58m/s para os ventos norte e nordeste, respectivamente. Esses resultados corroboram com os encontrados por Adamu et al. (2012), tal estudo aponta significativa variação na velocidade do ar para as seguintes estratégias: abertura unilateral simples, abertura unilateral dupla, abertura unilateral com torre de ventilação e abertura unilateral com saída pelo forro.

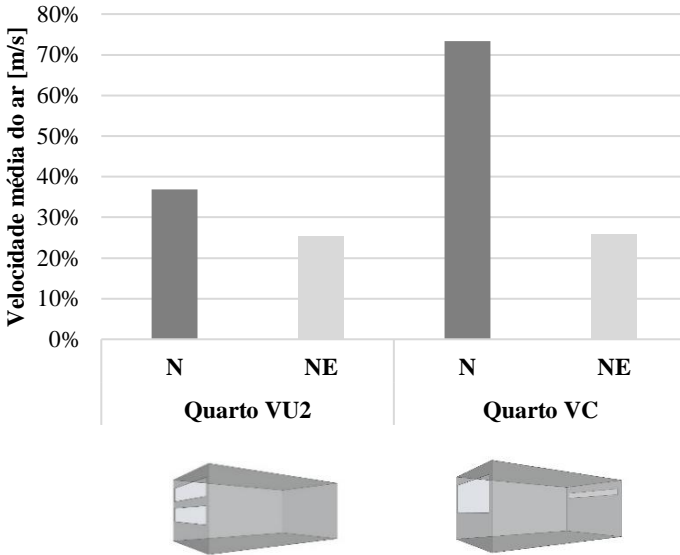
Apesar das diferenças no comportamento da ventilação discutido anteriormente, nota-se que os quartos VC e VU2 apresentam o mesmo valor de velocidade média do ar interno quando expostos ao vento nordeste. Esta situação confirma resultados de estudo anteriores que indicam que nem sempre o desempenho da ventilação cruzada é superior à ventilação unilateral. Chenari et al. (2016) apontam um desempenho similar entre ambas as estratégias no caso de ventos desfavoráveis em termos de direção e velocidade.

No entanto, com o vento favorável de direção norte, o quarto VC apresenta uma maior elevação na velocidade do ar. O mesmo não ocorre com o quarto VU1, em que a diferença entre o desempenho do vento norte e nordeste é insignificante. O aumento percentual da velocidade média do ar interno do vento norte em relação ao vento nordeste é de 1% para o quarto VU1, 10% para o quarto VU2 e 28% para o quarto VC.

De maneira geral, a ação do vento nordeste (45°) resulta em valores de velocidades inferiores se comparado ao vento norte (0°). No entanto, confirmam-se as constatações de estudos anteriores (AYATA; YILDIZ, 2006) de que, além da própria estratégia adotada, a orientação do edifício de acordo com o vento predominante pode melhorar substancialmente o desempenho da ventilação natural

A Figura 44 apresenta o gráfico do aumento percentual da velocidade média do ar interno em relação ao quarto VU1 (base). O aumento percentual apresentado pelo caso VU2 é de 37% e 25% para os ventos norte e nordeste, respectivamente.

Figura 44 – Aumento percentual da velocidade média do ar interno em relação aos quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada) com vento norte e nordeste de 1 à 6m/s.



Embora a análise do comportamento da ventilação feita anteriormente aponte semelhanças entre os quartos VU1 e VU2, a simples separação da abertura unilateral em duas aberturas diminui a interferência do ar de saída sobre o ar de entrada. Os resultados estão de acordo com as constatações de Schulze et al. (2013), Gratia et al. (2004) e Chu et al. (2015) de que a ventilação unilateral com duas aberturas separadas funciona melhor porque o ar de entrada consegue penetrar com maior velocidade no ambiente interno. Schulze et al. (2013) e Gratia et al. (2004) compararam simulações em ambientes com aberturas unilaterais simples e com aberturas unilaterais duplas separadas verticalmente. Chu et al. (2015), por sua vez, submeteram o protótipo de um ambiente com aberturas unilaterais separadas horizontalmente a um túnel de vento.

No quarto VC, este aumento percentual é ainda maior, sendo 73% e 26% para os ventos norte e nordeste, respectivamente. A ventilação cruzada permite com que o ar não apenas entre na edificação com velocidade elevada, mas que continue o seu percurso até a saída pelas

janelas dos fundos sem tanta interferência do fluxo de retorno do ar, observado nos quartos VU1 e VU2.

4.1.3.Distribuição da velocidade do ar

A avaliação com foco no usuário inicia pela análise da distribuição da velocidade do ar no quarto de internação. Apesar do ambiente estar exposto a um vento externo de mesma direção e velocidade, os usuários estão sujeitos a distintas condições de ventilação de acordo com seu posicionamento no espaço.

A Figura 45 apresenta as velocidades do ar sobre os acompanhantes e pacientes do quarto de internação VU1. Os cortes revelam os resultados obtidos pelas simulações para os ventos norte e nordeste com uma velocidade média de 3m/s. A escolha desta condição do vento externo considerou a frequência de ocorrência para a cidade de Florianópolis.

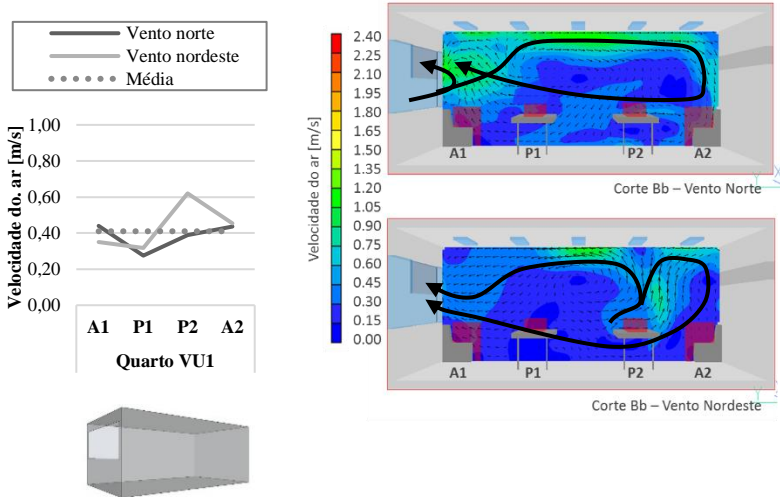
Com o vento norte, a maior velocidade do ar ocorre sobre o acompanhante 1, seguida do acompanhante 2, paciente 2 e paciente 1. Apenas o acompanhante 1 (mais próximo à janela) está sujeito ao fluxo de ar de entrada. Logo em seguida, parte deste fluxo de ar sai pela porção superior da janela e outra parte continua seu percurso pelo teto até encontrar o acompanhante 2 na parede dos fundos. Neste momento, o fluxo de ar desce e retorna para sair pela única abertura disponível.

Desta forma, ao contrário do esperado, o fluxo de ar não segue a ordem do A1, P1, P2 e A2, mas sim A1, A2, P2 e P1. Nota-se que a velocidade do ar interno apresenta relação direta com a sequência do percurso do fluxo de ar. Esta relação também foi observada por Prajongsan e Sharples (2012) em suas simulações CFD para analisar a eficiência do uso de shafts na parede oposta à entrada de ar em apartamentos em Bangkok. Os pesquisadores observaram que, à medida que o ar percorre o ambiente, sua velocidade reduz e volta a aumentar antes de encontrar uma saída.

A sequência de percurso do fluxo de ar com o vento nordeste é alterada e, conseqüentemente a distribuição da velocidade do ar interno também se modifica. Primeiramente, o ar atinge o P2, sendo o único usuário sujeito ao fluxo de ar da esquerda para a direita (ar de entrada). Em seguida, o fluxo de ar muda sua direção para cima, onde parte do fluxo segue pelo teto para a esquerda e a outra parte para a direita. O fluxo da direita atinge o acompanhante 2 e o fluxo da esquerda atinge ao paciente 1 antes de sair da edificação. Sendo assim, com o vento nordeste, a maior

velocidade média do ar está sobre o paciente 2 e a menor sobre o paciente 1 e acompanhante 1.

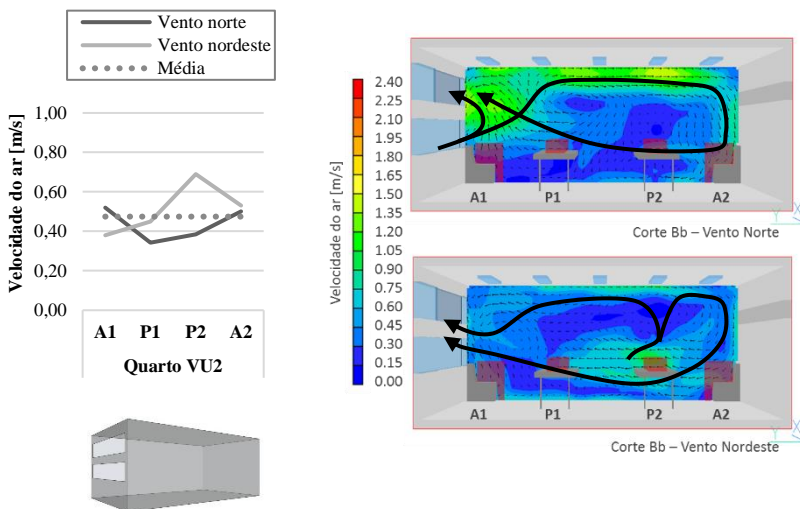
Figura 45 – Velocidade do ar sobre cada usuário para o quarto VU1 (ventilação unilateral simples) com velocidade do ar externo de 3m/s.



Conforme demonstram a Figura 45 e Figura 46, as curvas do quarto com ventilação unilateral simples (VU1) possuem um comportamento semelhante ao quarto com ventilação unilateral dupla (VU2). Em ambos os quartos com o vento norte, o fluxo de ar segue a ordem do A1, A2, P2, P1 e A1 novamente. Consequentemente, o vento nordeste também apresenta o mesmo comportamento observado no quarto VU1 e mantém a mesma sequência, sendo esta P2, A2, P1 e A1.

Apesar das semelhanças, observa-se no quarto VU2 valores de velocidades do ar interno superiores ao quarto VU1. Enquanto o quarto VU1 apresenta uma velocidade média de 0,40 m/s, o quarto VU2 resulta em uma média de 0,47 m/s sobre os usuários.

Figura 46 – Velocidade do ar sobre cada usuário para o quarto VU2 (ventilação unilateral dupla).



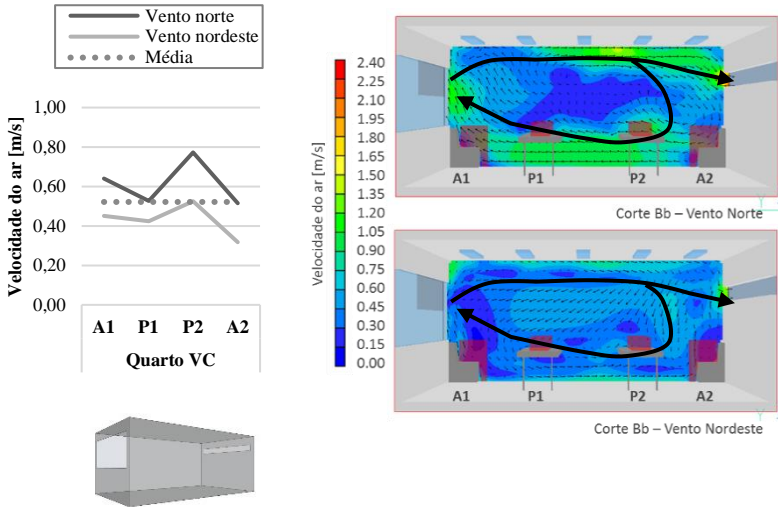
O comportamento do fluxo de ar nos quartos com ventilação cruzada se distingue dos quartos VU1 e VU2. Conforme ilustra a Figura 47, logo que entra na edificação, o fluxo de ar segue seu percurso pelo teto, desviando da área ocupada pelos usuários. A seguir, parte deste fluxo sai pela abertura oposta à entrada do ar e parte retorna para sair pela janela principal. Ao retornar, o fluxo de ar se torna descendente e atinge diretamente ao paciente 2, resultando na maior velocidade do ar entre os usuários.

A menor velocidade do ar interno é registrada sobre o acompanhante 2. A baixa influência da ventilação natural sobre este usuário ocorre devido à altura elevada da abertura de saída, distanciando o fluxo de ar da área onde encontra-se o A2. Assim como nos estudos de Prajongsan e Sharples (2012), o fluxo de ar que de retorno ganha velocidade antes de sair pela janela principal, aumentando a velocidade do ar sobre o acompanhante 1 em comparação ao paciente 1.

Conforme demonstra as curvas no gráfico da Figura 47, a distribuição da velocidade do ar para os ventos norte e nordeste são semelhantes. O mesmo não ocorre nos quartos com ventilação unilateral

(Figura 45 e Figura 46), onde observa-se claras diferenças quando expostos ao vento norte ou nordeste.

Figura 47 – Velocidade do ar sobre cada usuário para o quarto VC (ventilação cruzada).



4.2.CONFORTO TÉRMICO

Para verificação da aplicabilidade das estratégias de ventilação natural em quartos de internação na cidade de Florianópolis, faz-se necessária a avaliação do conforto térmico para cada usuário em dias típicos de verão e meia estação. A condição de conforto térmico tem como critério de avaliação o modelo adaptativo ASHRAE Standard 55 (2013).

4.2.1.Verão

Conforme visto na análise climática, a temperatura média do ar externo em um dia típico de verão é 25°C e as direções dos ventos predominantes são norte e nordeste. Desta forma, os casos foram simulados para ambos os ventos e com velocidades de 1,0; 3,0 e 6,0m/s. A Figura 48 apresenta o gráfico do conforto adaptativo para cada quarto

(VU1, VU2 e VC) e usuário (acompanhantes 1 e 2, pacientes 1 e 2) em um dia típico de verão. Os casos foram simulados para ambos os ventos e com velocidades de 1,0; 3,0 e 6,0m/s, sendo representados por círculos amarelo, rosa e azul, respectivamente.

Uma vez que ambientes com temperatura operativa superior a 25°C podem ter os limites da zona de conforto ampliados quando sujeito a velocidade do ar acima de 0,3m/s, foram consideradas as correções do limite superior da zona de conforto para velocidades do ar de 0,3 a 0,6m/s; 0,6 a 0,9m/s e 0,9 a 1,2m/s (ASHRAE Standard 55, 2013).

As situações de conforto corrigido em decorrência de velocidades elevadas do ar são representadas pelas seguintes formas geométricas: losango, quadrado e triângulo. O losango indica velocidades do ar entre 0,9 e 1,2m/s, o quadrado entre 0,6 e 0,9m/s e o triângulo entre 0,3 e 0,6m/s.

A Figura 48 revela que, em um dia típico de verão, as temperaturas operativas sobre os usuários variam de 25 a 30°C. Um fator importante para a elevação da temperatura operativa é a velocidade do ar externo. Com o vento a 1m/s, a temperatura operativa média sobre os usuários nos três quartos é de 28,4°C. Ao elevar a velocidade do ar externo para 3 e 6m/s, este valor reduz para 27,3 e 26,4°C, respectivamente.

Observa-se que as temperaturas operativas mais elevadas ocorrem em condições de baixa velocidade do ar sobre os usuários (<0,3m/s). Estes resultados corroboram com o estudo de Pires (2015), também realizados na cidade de Florianópolis, o qual conclui que movimentações do ar abaixo de 0,30 m/s não são suficientes para auxiliar nas trocas de calor do indivíduo em um ambiente naturalmente ventilado no verão de Florianópolis.

Outro aspecto determinante para o conforto térmico é a temperatura radiante, diretamente associada à temperatura operativa (FANGER; CHRISTENSEN, 1986). O posicionamento do usuário A1, mais próximos a parede externa, o expõe à incidência do ganho de calor por temperatura radiante da parede. Em todos os quartos, o A1 está em desconforto quando a velocidade do ar externo é de 1m/s, resultando em temperaturas operativas entre 29 e 30°C.

Ainda com relação ao acompanhante 1, observam-se situações de correção do desconforto térmico proporcionado por velocidades do ar superiores à 0,3m/s. Com o vento nordeste a 3m/s e 6m/s, a velocidade do ar sobre o acompanhante 1 está entre 0,3 e 0,6m/s nos quartos com ventilação unilateral dupla e ventilação cruzada. Velocidades ainda

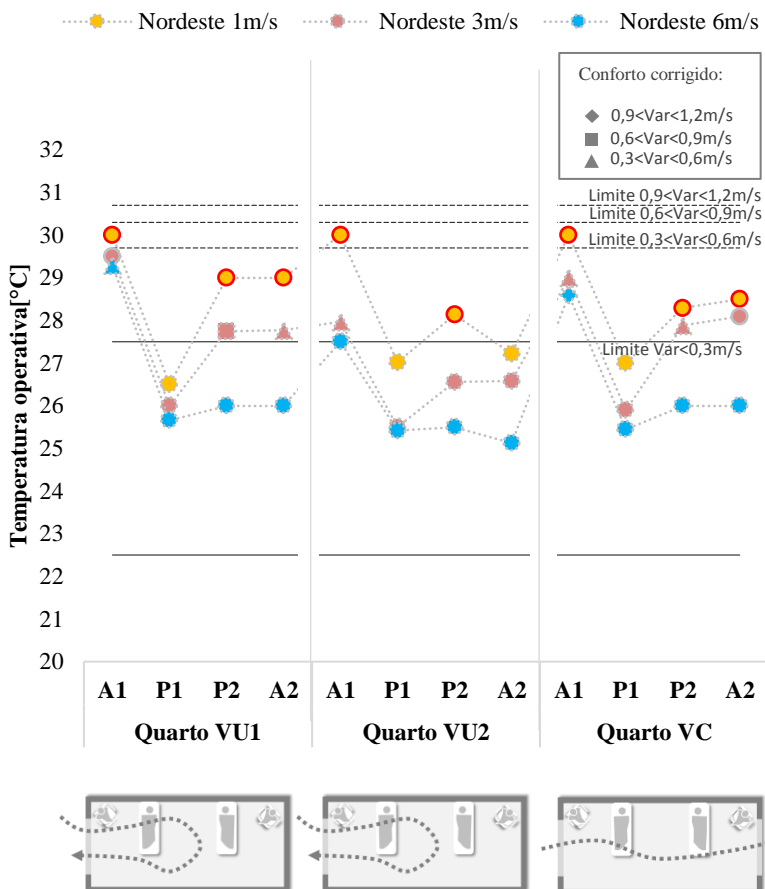
maiores (entre 0,9 e 1,2m/s) são registradas sobre o acompanhante 1 no quarto com ventilação cruzada (VC) para o vento nordeste à 6m/s.

Os demais usuários, representados por P1, P2 e A2 (paciente 1, 2 e acompanhante 2) apresentam temperaturas operativas médias de 26,1; 27,2 e 27,1°C, respectivamente. Estes usuários encontram-se dentro da zona de conforto em um dia típico de verão com velocidade do ar externo a partir de 3m/s. Nos quartos com ventilação unilateral simples (VU1) e com ventilação cruzada (VC) a condição de desconforto é corrigida pelo registro de velocidades elevadas do ar.

Ao contrário do esperado, o quarto com ventilação cruzada apresenta desempenho pior que o quarto com ventilação unilateral dupla para o vento nordeste. Isto ocorre porque, ao incidir à 45° na abertura de entrada, o vento nordeste não alcança a área ocupada pelos usuários (planta baixa da Figura 42). Neste caso, o ar flui pela parede leste, oposta à área onde encontram-se os usuários, e logo sai pela janela de saída na parede dos fundos. Uma vez que o quarto com ventilação unilateral não possui a janela de saída, este fluxo de ar que retorna para voltar pela mesma abertura de entrada consegue atingir os usuários (planta baixa da Figura 41). O mesmo não ocorre com no quarto VC, onde a ventilação cruza o ambiente sem que haja um retorno que efetivamente promova a movimentação do ar sobre na área ocupada pelos usuários.

Esta situação enfatiza a importância do layout para o aproveitamento mais efetivo dos ventos predominantes, principalmente em ambientes hospitalares, onde os pontos de instalações de gases medicinais dificultam mudanças essenciais para a garantia do conforto dos usuários. No quarto VC, o desempenho da ventilação cruzada com o vento nordeste poderia ser otimizado caso os usuários estivessem na parede oposta.

Figura 48 – Conforto adaptativo no verão com vento nordeste para os quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada).



A partir dos gráficos do conforto térmico adaptativo tem-se a percentagem de aceitabilidade do ambiente térmico no verão (Figura 49). O número total de usuários considerado para cada quarto é 8, sendo 4 para o caso com o vento norte e 4 para o vento nordeste.

O quarto VU1 resulta em apenas 34% de aceitabilidade com ventos a 1m/s. Nesta situação, a velocidade do ar interno não é suficiente

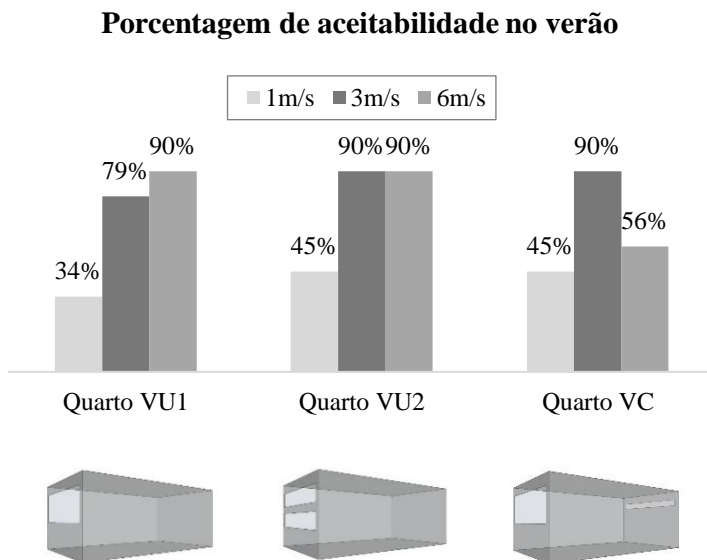
para reduzir o desconforto térmico provocado pela ganho de calor por temperatura radiante da parede externa e pelas cargas internas do quarto. Chenari et al. (2016) recomendam a adoção de estratégias de ventilação híbrida, que alterna o uso da ventilação natural com sistemas de condicionamento artificial quando necessário, para suprir a baixa disponibilidade de ventos.

Ao elevar a velocidade do ar externo em 3 e 6m/s, há uma melhora significativa nesta condição, resultando em 79% e 90% de aceitabilidade, respectivamente. Levin (2011) enfatiza que a ventilação unilateral simples necessita de velocidades elevadas do ar externo para satisfazer o conforto térmico dos usuários, por isso em determinadas horas do dia o quarto deverá ter o apoio da ventilação mecânica ou condicionamento artificial.

Por outro lado, a ventilação unilateral dupla apresenta um bom desempenho mesmo em condições de ventos com velocidade mais baixas. Os estudos em túneis de vento de Chu et al. (2015), também revelaram esta melhora substancial do conforto térmico em um ambiente com ventilação unilateral dupla comparado ao mesmo ambiente com ventilação unilateral simples.

A melhora das condições de conforto térmico do quarto VU2 o coloca em uma posição comparável ao quarto com ventilação cruzada (VC). Em ambos os quartos, ventos externos de 1m/s resultam em 45% de aceitabilidade. Ao elevar a velocidade do ar externo para 3 m/s, todos os usuários estão na zona de 90% de aceitabilidade. Com ventos de 6m/s, o quarto VU2 mantém 90% de aceitabilidade e o quarto VC reduz para 56% de aceitabilidade. Neste caso, os usuários são prejudicados pela velocidade elevada do ar interno. Para Toftum (2004), a introdução de mecanismos de controle pessoal da velocidade do ar é essencial, uma vez que situações de desconforto podem ser revertidas pela automatização ou controle manual da abertura das janelas.

Figura 49 – Porcentagem de aceitabilidade do ambiente térmico no verão com os ventos predominantes norte e nordeste de 1 à 6m/s para os quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada).



4.2.2. Meia estação

Além das condições de conforto térmico para o verão, fez-se necessária a investigação da efetividade da ventilação natural na meia estação. Conforme apresentado anteriormente, o resultado do cálculo da temperatura média predominante para um dia típico da meia estação em Florianópolis é de 16,8°C.

A Figura 50 revela temperaturas operativas variando entre 20 e 26°C na área onde encontram-se os usuários dos quartos de internação. Sendo que, com o vento externo a 1m/s, a temperatura operativa média nos três quartos é de 23,1°C. Ao elevar a velocidade do ar externo para 3 e 6m/s, este valor reduz para 21,9 e 21,2°C, respectivamente.

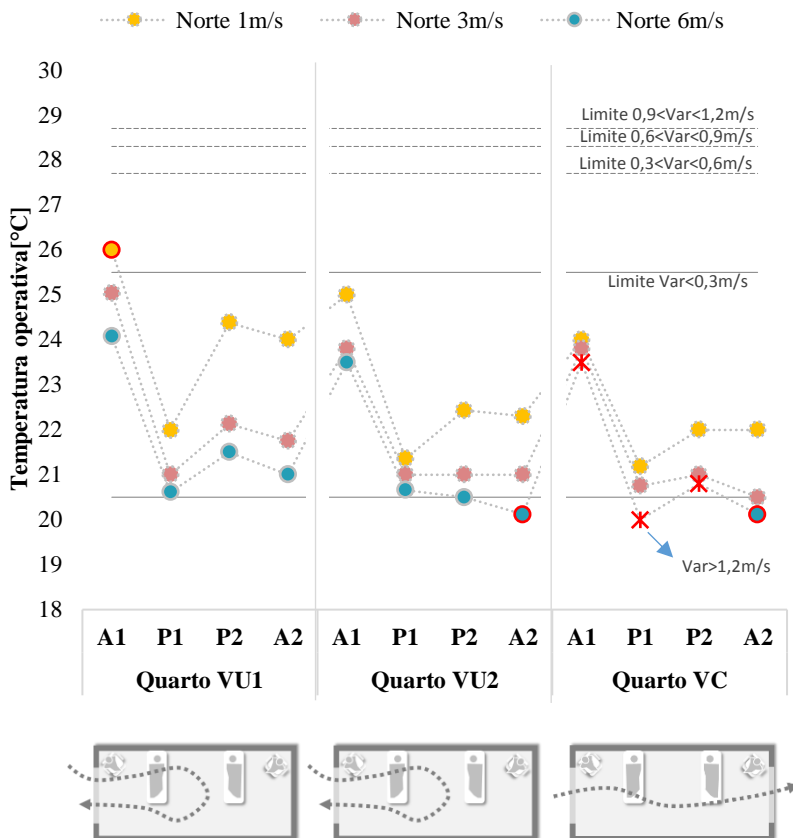
Novamente, as temperaturas operativas mais elevadas ocorrem sobre o acompanhante 1. No entanto, este usuário está em desconforto pelo calor apenas no quarto com ventilação unilateral simples (VU1) exposto ao vento com velocidade de 1m/s.

As demais condições de desconforto ocorrem pelo frio. Ainda no quarto VU1, o paciente 2 se aproxima do limite da zona de conforto com o vento norte à 6m/s. No quarto que adota a ventilação unilateral dupla (VU2), o paciente 2 e acompanhante 2 já apresentam maior tendência a se sentir insatisfeitos com o ambiente térmico com velocidades elevadas do ar externo. Essa situação corrobora com os resultados de Capeluto (2005), que indicam que ventos com mais de 6m/s devem ser evitados. Segundo dados apresentados anteriormente, a frequência de ocorrência de ventos nesta grandeza é de 5 a 8% no verão e meia estação em Florianópolis (Figura 24).

Além de provocar o desconforto por frio, velocidades do ar muito elevadas podem causar insatisfação pela movimentação excessiva do ar no quarto com ventilação cruzada (VC). Os asteriscos indicados no gráfico da Figura 50 destacam alguns usuários expostos a velocidade do ar superiores à 1,2m/s. A ASHRAE Standard 55 (2013) fixa o limite superior em 0,8m/s e 1,2m/s em espaços naturalmente ventilados sem e com mecanismos de controle (ventiladores, janelas operáveis, entre outros), respectivamente.

Situação de desconforto pela excessiva movimentação do ar é observada para os pacientes 1 (2,0m/s) e 2 (1,4m/s). Se considerarmos outros estudos, o paciente 2 não estaria em desconforto. De Vecchi (2011) demonstra uma aceitabilidade da velocidade do ar de 0,4 a 1,40 m/s em condições de tempo quente e úmido em salas de aula com ventiladores de teto na cidade de Florianópolis.

Figura 50 – Conforto adaptativo na meia estação com vento norte para os quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada).



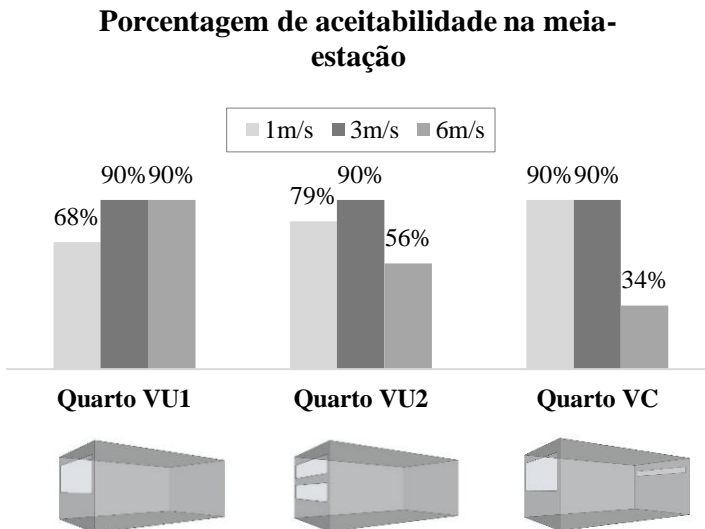
A partir dos gráficos do conforto térmico adaptativo tem-se o número de usuários na zona de conforto, considerando 90% de aceitabilidade do ambiente térmico na meia estação com os ventos norte e nordeste de 1 à 6m/s (Figura 51).

O quarto com ventilação unilateral simples (VU1) é o único onde não se observa situações de desconforto por frio, porém ainda pode haver insatisfação pelo calor. Sendo assim, resulta em 68% de aceitabilidade do ambiente térmico com ventos a 1m/s.

A medida que a velocidade do ar externo é elevada, surgem situações de desconforto pelo frio nos quartos VU2 e VC. A Figura 51 demonstra que ventos à 6m/s resultam em 56% e 34% de aceitabilidade térmica nos quartos VU2 e VC, respectivamente.

A adoção da estratégia de ventilação cruzada e ventilação unilateral dupla é vantajosa por não apresentar desconforto por calor mesmo com pouca disponibilidade de ventilação natural. Todavia, há uma maior tendência ao desconforto por frio com o aumento da ventilação natural. Nestes casos, a possibilidade de controle da abertura das janelas é determinante para o conforto térmico.

Figura 51 – Porcentagem de aceitabilidade do ambiente térmico na meia estação com os ventos predominantes norte e nordeste de 1 à 6m/s para os quartos VU1 (ventilação unilateral simples), VU2 (ventilação unilateral dupla) e VC (ventilação cruzada).



4.3.RENOVAÇÃO DO AR

O capítulo anterior demonstra que o desempenho da ventilação natural para o conforto térmico depende diretamente da velocidade e direção do vento. No verão, o aumento da velocidade do ar interno pode reduzir o risco de desconforto pelo calor. Por outro lado, o período de meia estação não requer velocidades do ar muito elevadas para a garantia do conforto térmico. Apesar destas diferenças, independente do período, a ventilação natural em quartos de internação deve ser capaz de promover a renovação do ar para não comprometer a saúde dos pacientes.

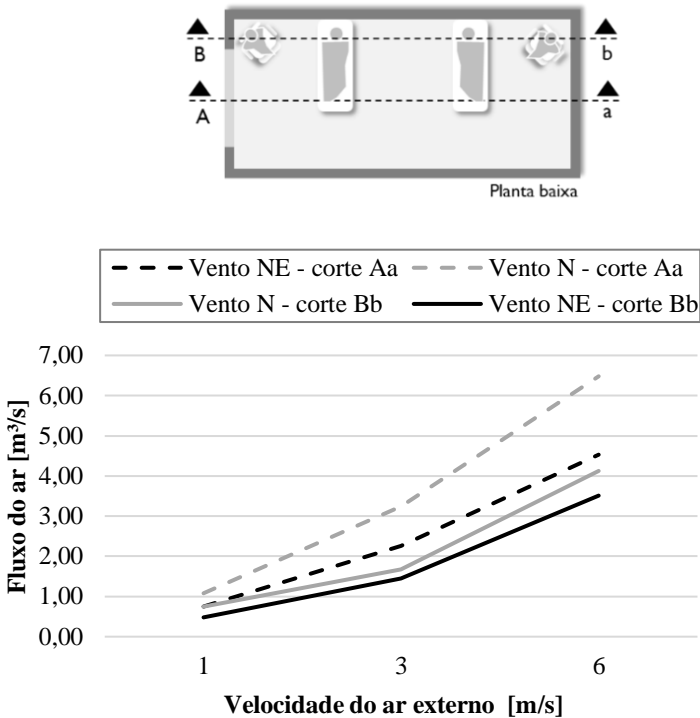
4.3.1.Influência da velocidade e direção do vento sobre a taxa de renovação do ar

Atualmente, vem sendo discutida a possibilidade de aplicação da estratégia de ventilação natural em hospitais. Levin (2011) listou os principais desafios para o projeto de ambientes naturalmente ventilados que garantam a proteção contra agentes infecciosos. Dentre eles destacam-se a dependência com as condições climáticas locais e a configuração dos edifícios com ênfase na análise criteriosa do efeito da ventilação em cortes esquemáticos.

Desta maneira, a Figura 52 indica a relação entre a taxa de fluxo de ar, velocidade e direção do ar externo nos cortes Aa e Bb (corte no meio do quarto e sobre os usuários, respectivamente), sendo considerado o valor média para todo o plano de corte. A análise é feita para a média dos três quartos com diferentes estratégias de ventilação.

Observa-se que a taxa de renovação e a velocidade do ar são diretamente proporcionais, no entanto, a associação é maior no caso do vento norte. Enquanto o vento norte à 1 m/s resulta em um fluxo de ar de 1,08 m³/s no meio do quarto; com o vento nordeste o fluxo de ar cai para 0,75 m³/s. A diferença é ainda maior com a velocidade do ar externo de 3 m/s, resultando em fluxos de ar para os ventos norte e nordeste, de 3,24 m³/s e 2,26 m³/s, respectivamente. Este valor dobra para o vento externo à 6 m/s, atingindo fluxos de ar de 6,48 m³/s com o vento norte e 4,53 m³/s com o vento nordeste.

Figura 52 – Relação entre taxa de renovação, velocidade e direção do ar externo para a média dos três quartos de internação.



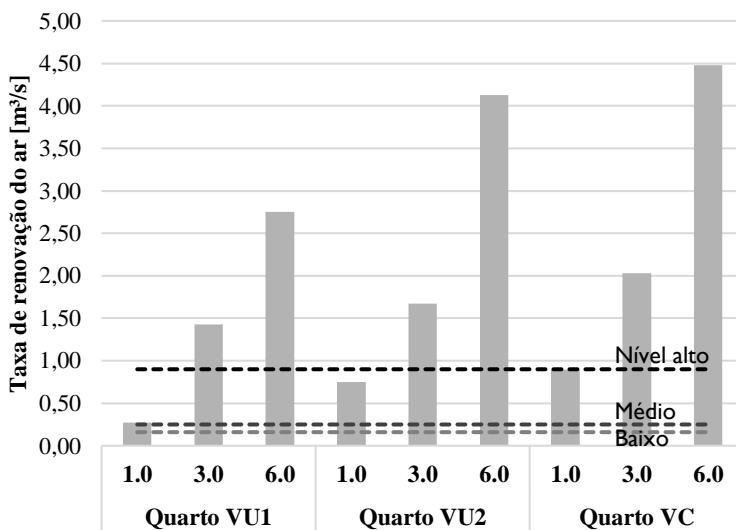
Outra constatação importante é o pior desempenho da ventilação natural na renovação do ar na área ocupada pelos usuários. Enquanto no corte feito no meio do quarto a taxa de renovação do ar para o vento norte à 1m/s, por exemplo, é de 1,08m³/s, no corte sobre os usuários este valor cai para 0,84m³/s. O mesmo ocorre para o vento nordeste, porém com uma diferença levemente menor, resultando em uma taxa de renovação 0,75m³/s no meio do quarto e 0,54m³/s sobre os usuários. O gráfico indica que esta diferença é ainda maior com ventos mais fortes.

4.3.2. Comparativo com as taxas de renovação recomendadas pelas normativas

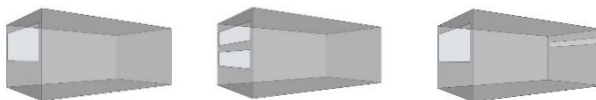
Diversas normativas estabelecem valores de referências para a taxa de renovação do ar em hospitais. O processo de definição destas recomendações se baseia na qualidade do ar e varia de acordo com o nível de risco de infecção e, em alguns casos, na quantidade de pessoas no ambiente (CHENARI et al., 2016).

A Figura 53 apresenta a taxa de renovação do ar sobre os usuários dos três quartos de internação expostos ao vento norte de 1,0; 3,0 e 6,0 m/s. Os resultados obtidos são comparados com os três níveis de taxa de renovação do ar encontrados nas normativas: nível baixo, médio e alto.

Figura 53 – Taxa de renovação do ar com ventos norte de 1,0; 3,0 e 6,0 m/s.



Velocidade do ar externo [m/s]



Os níveis baixo e médio são atingidos por todos os quartos mediante a disponibilidade de velocidades do ar externo acima de 1,0 m/s. Além das normativas referentes ao nível baixo, outras publicações fazem menção às taxas mínimas de renovação do ar com valores iguais ou menores. A ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (2007), por exemplo, recomenda 0,013m³/s/paciente. O guia da OMS (2009) inclui ainda a recomendação de 0,06 m³/s/paciente em enfermarias em geral, sem o risco de infecção. O Guidelines for design and Construction of Hospital and Outpatient Facilities, publicado em 2014 pelo Facility Guidelines Institute (FGI), também considera 4 ACH (trocas de ar por hora) para quartos de internação naturalmente ventilados, resultando em 0,08m³/s.

Além disso, a Figura 53 indica que, com aumento da exigência de taxa de renovação para o nível alto, apenas o quarto com ventilação cruzada é capaz de garantir a renovação do ar mínima com ventos de 1,0m/s. No entanto, em situações de ventos a 3m/s, ambos os quartos com ventilação unilateral ampliam a renovação do ar, atendendo ao nível alto.

O fato do nível alto ser atingido somente em situações de boa disponibilidade de ventos, dificulta o atendimento da RE n°09 (ANVISA, 2003). Na prática, o valor recomendado por esta resolução está bem acima das normativas encontradas. Se convertermos em trocas de ar por hora, enquanto os níveis baixo e médio se referem à 8 e 12 ACH, o nível alto representa 45 ACH. Para se atingir 45 ACH com o uso da ventilação natural, o quarto de internação necessitaria de condições de ventos favoráveis (direção e velocidade do ar externo) por um longo período de tempo. No entanto, os ventos apresentam uma grande variabilidade, dificultando o atendimento constante de uma taxa de renovação de ar alta.

Observa-se ainda que a renovação do ar no quarto com ventilação unilateral simples atende às normativas (nível baixo e médio), porém com maior dificuldade. A baixa efetividade para a renovação do ar em um ambiente com ventilação unilateral simples também foi registrada por Schulze e Eicker (2013).

5.CONCLUSÕES

Este trabalho teve como foco a análise do desempenho da ventilação natural no conforto térmico e na renovação do ar em quartos de internação por meio de simulações CFD.

As temperaturas operativas, velocidades do ar e fluxo de ar em um mesmo quarto de internação se mostraram bastante heterogênea e, conseqüentemente, foram observadas diferenças importantes nas condições térmicas dos usuários de um mesmo ambiente. Estas diferenças reveladas pela simulação CFD suscitam em questionamentos acerca dos modelos de análise do desempenho térmico que utilizam somente um ponto no espaço para traduzir os resultados de conforto térmico no ambiente.

Os resultados encontrados referentes a análise do conforto térmico revelam uma maior eficiência do vento norte (ângulo de incidência de 90°) em relação ao vento nordeste (ângulo de incidência 45°). Verificou-se ainda que ventos de até 1,0m/s são insuficientes para corrigir o desconforto por calor em um dia típico de verão apenas com o uso da ventilação natural, sendo importante a adoção de estratégias de ventilação híbrida que alterna o uso da ventilação natural com sistemas de condicionamento artificial ou sistemas mecânicos com o uso de ventilador de teto.

No entanto, observou-se que a ventilação natural favorece o conforto térmico nos quartos com ventilação unilateral dupla e ventilação cruzada nas situações recorrentes de ventos norte e nordeste acima de 1,0m/s em um dia típico de verão em Florianópolis. A ventilação unilateral simples, por sua vez, apresenta um desempenho satisfatório apenas na meia estação, quando a temperatura do ar é considerada aceitável e não requer elevadas velocidades do ar.

Em ambos os períodos o controle das aberturas é essencial para evitar ventos indesejados. Na meia estação, provavelmente o controle das aberturas deve ser utilizado para reduzir a ação dos ventos externos com velocidade a partir de 3m/s. Ressalta-se que os dias típicos não representam a totalidade da estação. Para uma conclusão mais precisa, seriam necessárias simulações dinâmicas que abrangessem um maior período ao longo do ano.

Ainda, com relação a análise da ventilação natural para a renovação do ar, verificou-se que o corte na área ocupada pelos usuários apresenta um desempenho inferior ao corte no meio do quarto, revelando

a importância da adequação do layout às condições de ventilação natural. Sugere-se atenção ao layout, pois parece ser primordial a localização dos usuários no espaço para que usufruam dos benefícios da ventilação natural. Especialmente em quartos de internação hospitalar, onde o layout esta intrinsecamente relacionado aos pontos de instalações de gases medicinais, dificultando adequações futuras para a garantia do conforto dos usuários.

Observou-se que, os níveis baixo e médio de renovação do ar tendem a ser atingidos por todos os quartos mediante a disponibilidade de velocidades do ar externo acima de 1,0 m/s. O nível alto é atingido apenas em situações de ventos acima de 3,0 m/s. Não se pode afirmar que este valor é inadequado, porém, parece que na prática, a taxa de renovação do ar exigida pelo nível alto está bem acima dos estudos encontrados sobre a qualidade do ar interno.

Os resultados desta pesquisa apontam um melhor desempenho das estratégias de ventilação unilateral dupla e ventilação cruzada em comparação à ventilação unilateral simples, amplamente utilizada em quartos de internação. Frente a dificuldade de adotar a ventilação cruzada em ambientes hospitalares, a ventilação unilateral dupla parece ser uma alternativa eficiente para o conforto térmico e renovação do ar.

5.1.DIRETRIZES PARA PROJETOS DE AMBIENTES DE INTERNAÇÃO HOSPITALAR NATURALMENTE VENTILADOS

A partir das conclusões apontadas, foram elaboradas diretrizes para o projeto de ambientes de internação hospitalar naturalmente ventilados:

- Prever o efeito de obstrução da ventilação natural causado por edifícios vizinhos, massa de vegetação ou topografia do terreno;
- Privilegiar posicionamento dos quartos de internação nas fachadas com ângulo de incidência entre 45° e 90° dos ventos dominantes;
- Dimensionar janelas com, no mínimo, 1/6 da área do piso e fator de abertura de 50%;
- Prever elementos de proteção solar móveis nas janelas ou fixos desde que não obstruam a ventilação natural;
- Privilegiar o uso de tipologias arquitetônicas que possibilitem a ventilação cruzada;

- No caso da impossibilidade da ventilação cruzada, adotar a ventilação unilateral dupla;
- Prever pé-direito alto para maior diferença de altura entre a abertura inferior e superior em quartos com ventilação unilateral dupla;
- Considerar no layout o alinhamento entre os leitos e abertura efetiva das janelas para melhor aproveitamento do fluxo de ar de entrada;
- Avaliar condições climáticas e prever o uso auxiliar de ventilador de teto ou ar condicionado quando necessário;
- Prever dispositivos de controle da abertura para evitar ventos indesejados.

5.2.LIMITAÇÕES DO TRABALHO

As principais limitações encontradas durante a realização desta pesquisa estão relacionadas à etapa de modelagem CFD. Estas representam o comportamento do fluido em uma fração de tempo. Para isto, a especificação das condições de contorno limitou as análises a um dia típico de verão e um dia típico de meia estação.

Sabe-se que as velocidades e temperaturas do ar assumidas nos modelos de simulação são procedentes de estações meteorológicas afastadas dos centros urbanos, onde geralmente estão localizados os hospitais. Nestes centros urbanos, estão presentes aspectos modificadores do clima, como: ilhas de calor, barreiras arquitetônicas, altura da edificação, entre outros. No entanto, devido à falta de um coeficiente validado que defina estas mudanças para o contexto de Florianópolis, estas modificações foram desconsideradas.

Com relação ainda aos parâmetros de entrada da simulação, para contemplar o efeito da radiação solar, o software requer informações sobre o ganho de calor pelas paredes. Por esta razão, foi necessário o cálculo estimativo do ganho de calor pela parede norte para a situação mais crítica. Diferentes condições de radiação solar poderiam modificar os resultados.

No âmbito da análise de conforto térmico, há uma lacuna no conhecimento sobre o conforto térmico em pessoas com saúde fragilizadas. Estudos encontrados não especificam uma faixa de conforto para pessoas doentes, mas apontam uma preferência por temperaturas levemente mais altas. Devido à falta de informações conclusivas, nesta

pesquisa foram utilizados os limites de faixa de conforto para adultos saudáveis.

5.3.RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho surgiram algumas indagações que podem ser contempladas em futuros trabalhos sobre o assunto:

- Investigar a aplicabilidade do modelo adaptativo de análise de conforto térmico para pacientes em quartos de internação naturalmente condicionados em Florianópolis;
- Avaliar a efetividade das taxas de renovação do ar propostas pelas normativas para a dissipação de contaminantes e redução da concentração de CO₂ em quartos de internação naturalmente ventilados;
- Investigar o desempenho diferentes tipos de esquadrias em quartos de internação, variando tamanho, posição e sistema de abertura;
- Avaliar o desempenho térmico dos casos apresentados nesta pesquisa por meio de simulações dinâmicas que abranjam um longo período de tempo.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7256**: Tratamento de ar em estabelecimentos assistenciais de saúde, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 16401**: Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008.

ADAMU, Z. A.; PRICE, A. D. F.; COOK, M. J. Performance evaluation of natural ventilation strategies for hospital wards – A case study of Great Ormond Street Hospital. **Building and Environment**, v. 56, p. 211–222, 2012.

AFLAKI, A.; MAHYUDDIN, N.; BAHARUM, M. R. The influence of single-sided ventilation towards the indoor thermal performance of high-rise residential building: A field study. **Energy and Buildings**, v. 126, p. 146–158, 2016.

AHA, A. H. A. **Infection Control in the Hospital**. Chicago, 1979.

ALLOCCA, C.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L. R. Design analysis of single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 8, p. 785–795, 2003.

ANVISA, AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **RDC n. 50**, de 21 de fevereiro de 2002. Dispõe sobre o regulamento técnico para planejamento, programação, elaboração e avaliação de projetos físicos de estabelecimentos assistenciais a saúde. Brasília, 2002.

_____. **Resolução n.o 9**, de 16 de janeiro de 2003. Dispõe sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizados Artificialmente de Uso Público e Coletivo. Brasília, 2003.

ARGIRIOU, A.; ASIMAKOPOULOS, D.; BALARAS, C.; et al. On the energy consumption and indoor air quality in office and hospital buildings in Athens, Hellas. **Energy Conversion and Management**, v. 35, n. 5, p. 385–394, 1994.

ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 62.1** - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta, 2007.

_____. **ASHRAE Standard. 55:** Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2013.

_____. **ASHRAE Standard 170.** , Atlanta, 2013.

AYATA, T.; YILDIZ, O. Investigating the potential use of natural ventilation in new building designs in Turkey. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 8, p. 959–963, 2006.

BRASIL, MINISTÉRIO DA SAÚDE. **SomaSUS:** Sistema de Apoio à Organização e Elaboração de Projetos de Investimento em Saúde. Brasília, 2013.

CANDIDO, C.; BITTENCOURT, L. **Introdução à Ventilação Natural.** Maceió: EDUFAL, 2006.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; LAMBERTS, R. Combined thermal acceptability and air movement assessments in a hot humid climate. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 379–385, 2011.

CAPELUTO, I. G. A methodology for the qualitative analysis of winds: Natural ventilation as a strategy for improving the thermal comfort in open spaces. **Building and Environment**, v. 40, n. 2, p. 175–181, 2005.

CARVALHO, A. P. A. DE. **Temas de arquitetura de Estabelecimentos Assistenciais de Saúde.** 2 ed. ed. Salvador: UFBA/FAU/ISC, 2003.

CHAM. **Phoenics Ecylopaedia.** Disponível em:
<<http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_enc/encindex.htm>>. .

CHAUDHURY, H.; MAHMOOD, A.; VALENTE, M. **The Use of Single Patient Rooms versus Multiple Occupancy Rooms in Acute Care Environments Investigators.** Vancouver: Coalition for Health Environments Research (CHER), 2004.

CHENARI, B.; DIAS CARRILHO, J.; GAMEIRO DA SILVA, M.

Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1426–1447, 2016.

CHOW, T.-T.; YANG, X.-Y. Performance of ventilation system in a non-standard operating room. **Building and Environment**, v. 38, n. 12, p. 1401–1411, 2003.

CHU, C. R.; CHIU, Y. H.; TSAI, Y. T.; WU, S. L. Wind-driven natural ventilation for buildings with two openings on the same external wall. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 365–372, 2015. .

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 549–561, 2002.

DE VECCHI, R. **Condições de conforto térmico e aceitabilidade da velocidade do ar em salas de aula com ventiladores de teto para o clima de Florianópolis/SC**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

ESCOMBE, A. R.; OESER, C. C.; GILMAN, R. H.; et al. Natural Ventilation for the Prevention of Airborne Contagion. **PLoS Medicine**, v. 4, n. 2, p. e68, 2007.

FANGER, P.; CHRISTENSEN, N. Perception of draught in ventilated spaces. **Ergonomics**, v. 29, n. 2, p. 215–235, 1986.

FOUCAULT, M. **Microfísica do poder**. Rio de Janeiro: GRAAL, 1979.

GAN, G. Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 31, n. 1, p. 65–73, 2000.

GÓES, R. DE. **Manual prático de arquitetura hospitalar**. São Paulo: Edgar Blucher, 2004.

GONZÁLEZ C, E. M. **Comportamiento Térmico de Edificaciones.**

Tabla: Cálculo de la Temperatura Media Interior en Región

Caliente, Maracaibo, 2013.

GRATIA, E.; BRUYÈRE, I.; DE HERDE, A. How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. **Building and Environment**, v. 39, n. 10, p. 1157–1170, 2004.

HWANG, R.-L.; LIN, T.-P.; CHENG, M.-J.; CHIEN, J.-H. Patient thermal comfort requirement for hospital environments in Taiwan. **Building and Environment**, v. 42, n. 8, p. 2980–2987, 2007.

INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Portaria INMETRO/MDIC no. 372, de 17 de setembro de 2010. Aprovar a revisão dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ)**. 2010.

JUNG, C.-C.; WU, P.-C.; TSENG, C.-H.; SU, H.-J. Indoor air quality varies with ventilation types and working areas in hospitals. **Building and Environment**, v. 85, p. 190–195, 2015.

KHODAKARAMI, J.; KNIGHT, I.; NASROLLAHI, N. Reducing the demands of heating and cooling in Iranian hospitals. **Renewable Energy**, v. 34, n. 4, p. 1162–1168, 2009.

KOLOKOTRONI, M. **Ventilation for Cooling**. In: **SANTAMOURIS, M. Advances in Passive Cooling**. EARTHSCAN ed. Londres, 2007.

LAMBERTS, R.; CANDIDO, C.; DE DEAR, R.; DE VECCHI, R. **Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort**, 2013.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3a ed. Rio de Janeiro, 2012.

LARSEN, T. S.; HEISELBERG, P. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 6, p. 1031–1040, 2008.

LEITE, R. C. V. **Cidade, vento, energia: limites de aplicação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido**, Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

LEVIN, H. Natural ventilation: A sustainable solution to infection control in healthcare settings? IAQ Conference. **Anais...** . p.10, 2011.

LIN, Z.; DENG, S. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Developing a thermal comfort model for sleeping environments. **Building and Environment**, v. 43, n. 70, p. 70–81, 2008.

LOMAS, K. J.; JI, Y. Resilience of naturally ventilated buildings to climate change: Advanced natural ventilation and hospital wards. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 6, p. 629–653, 2009. .

MELIKOV, A. K. Human body micro-environment: The benefits of controlling airflowinteraction. **Building and Environment**, v. 91, p. 70–77, 2015.

MEMARZADEH, F.; MANNING, A. Thermal comfort, uniformity, and ventilation effectiveness in patient rooms: performance assessment using ventilation indices. **ASHRAE Transactions Symposia**, p. 1–7, 2000.

MIQUELIN, L. C. **Morfologia dos edifícios hospitalares**. São Paulo, 1992.

MOHAMMED, R. H. Numerical Investigation of Indoor Air Quality and Thermal Comfort in a Ventilated Room. , v. 7, n. 12, p. 612–618, 2013.

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

NIELSEN, P. V. Fifty Years of CFD for Room Air Distribution. **Building and Environment**, v. 91, p. 78–90, 2015.

OLE FANGER, P.; TOFTUM, J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 533–536, 2002.

OLGYAY, V. **Design With Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism**. New Jersey: Princeton University Press, 1973.

OMS, ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings**. Switzerland, 2009.

PAIM, J.; TRAVASSOS, C.; ALMEIDA, C.; BAHIA, L.; MACINKO, J. O sistema de saúde brasileiro: história, avanços e desafios. **The Lancet**, p. 11–31, 2011.

PARK, D.; BATTAGLIA, F. Effect of heat loads and ambient conditions on thermal comfort for single-sided ventilation. **Building Simulation**, v. 8, n. 2, p. 167–178, 2014.

PIRES, M. O. **Conforto térmico em ambientes de escritórios naturalmente condicionados: pesquisa de campo na cidade de Florianópolis por meio da abordagem adaptativa**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

PRAJONGSAN, P.; SHARPLES, S. Enhancing natural ventilation, thermal comfort and energy savings in high-rise residential buildings in Bangkok through the use of ventilation shafts. **Building and Environment**, v. 50, p. 104–113, 2012.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: condicionamento térmico natural**. Porto Alegre: Da Universidade, 1985.

RUAN, F.; LI, N.; LONG, J. Calculation and assessing natural ventilation in a single opening office room with different windows in the regime of hot summer and cold winter. In: International IBPSA Conference. **Anais...**, Shanghai, 2012.

SANTAMOURIS, M.; ALLARD, F. **Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook**. London, UK: James and James (Science Publishers) Limited, 1998.

SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. **Building Ventilation: The State of the Art**. London: Earthscan, 2006.

SCHULZE, T.; EICKER, U. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, v. 56, p. 221–232, 2013.

SCOTTISH EXECUTIVE. **School design**: optimising the internal environment - Building our future: Scotland's School Estate.. Edinburgh: Scottish Executive, 2007. Disponível em: <<http://www.gov.scot/Resource/Doc/167966/0046205.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2016.

STABAT, P.; CACIOLO, M.; MARCHIO, D. Progress on single-sided ventilation techniques for buildings. **Advances in Building Energy Research**, v. 6, n. 2, p. 212–241, 2012.

SZKLO, A. S.; SOARES, J. B.; TOLMASQUIM, M. T. Energy consumption indicators and CHP technical potential in the Brazilian hospital sector. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 13-14, p. 2075–2091, 2004.

SZOKOLAY, S. V. **Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design**. 2a ed. ed. Architectural Press, 2008.

SZOKOLAY, S. V. **Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design**. 2a. ed. Architectural Press, 2008.

TOLEDO, L. C. **Feitos para Curar: Arquitetura Hospitalar e o processo projetual no Brasil**. Rio de Janeiro: ABDEH, 2006.

UĞURSAL, A.; CULP, C. H. The effect of temperature, metabolic rate and dynamic localized airflow on thermal comfort. **Applied Energy**, v. 111, p. 64–73, 2013.

ULRICH, R.; QUAN, X.; ZIMRING, C.; JOSEPH, A.; CHOUDHARY, R. **The Role of the Physical Environment in the Hospital of the 21 st Century : A Once-in-a-Lifetime Opportunity**. Relatório para The Center od Health Design. Concord, 2004.

VERHEYEN, J.; THEYS, N.; ALLONSIUS, L.; DESCAMPS, F. Thermal comfort of patients: Objective and subjective measurements in patient rooms of a Belgian healthcare facility. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1195–1204, 2011. Elsevier Ltd.

VERSAGE, R. D. S. **Ventilação natural e desempenho térmico em edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B. CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO₂ gas dispersion from a semi-enclosed stadium. **Building and Environment**, v. 61, p. 1–17, 2013.

YAU, Y. H.; CHANDRASEGARAN, D.; BADARUDIN, A. The ventilation of multiple-bed hospital wards in the tropics: A review. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1125–1132, 2011.

ZHAI, Z. Application of Computational Fluid Dynamics in Building Design: Aspects and Trends. **Indoor and Built Environment**, v. 15, n. 4, p. 305–313, 2006.

ZHANG, R.; LAM, K. P.; YAO, S.; ZHANG, Y. Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation. **Building and Environment**, v. 68, p. 100–113, 2013.

ANEXO A

“Tabela de Cálculo da temperatura média interior”

Desenvolvido pelo prof. Eduardo M. Gonzalez Cruz, Instituto de Investigaciones, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad del Zulia.

Referências: Pierre Lavigne et al (1994) Architecture Climatique. Une contribution au developpement durable. Edisud. France.

Tabela de Cálculo da temperatura média interior			
Equação de balanço térmico		$Q_{sv} + Q_{so} + Q_i = Q_c + Q_v + Q_e + Q_{ri}$	
Fluxo de calor por condução	Q_c	$Q_c = U \cdot A (T_{im} - T_{em})$	33 W
Fluxo de calor por convecção	Q_v	$Q_v = A \cdot q (T_{im} - T_{em})$	84 W
Ganho solar direto	Q_{sv}	$Q_{sv} = \sum F_{vn} \cdot S_{vn} \cdot \tau_{vn} (E_{vn}/24)$	9 W
Ganho solar indireto	Q_{so}	$Q_{so} = \sum F_{on} \cdot S_{on} \cdot \alpha_{on} (K_n/h_e) \cdot (E_{on}/24)$	0 W
Transmitância térmica total	U_t	$U_t = (U_p \cdot S_p) + (U_v \cdot S_v) + (U_i \cdot I)$	39 W/°C
Potência por ventilação	$A \cdot q$	$A \cdot q = 0,34 \cdot q$	99 W/°C
Ganhos internos	Q_i	$Q_i = \text{ilum.} + \text{pessoas} + \text{equip.}$	108 W
Perdas por evaporação	Q_e	$Q_e = 666,66 \text{ ev} \cdot f_{ef}$	0 W
Perdas por radiação de onda longa	Q_{ri}	$Q_{ri} = \epsilon_r \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_c^4)$	0 W
Temperatura média interior	T_{im}	$T_{im} = T_{em} - \Delta T_m$	25,8 °C
Diferença de Temperatura média	ΔT_m	$\Delta T_m = Q_{cv} + Q_{co} + Q_i - Q_e - Q_{ri} / U_t + A \cdot q$	0,8 °C

Temperatura média exterior	25 °C
Temperatura média exterior	7 °C

Temperatura de conforto	25,6 °C
-------------------------	---------

	Cumprim.	Largura	Altura	Área	Volume
Dimensões do ambiente	3,6	7,2	2,8	25,92	72,57

	Cobertura	Fac. Sul	Fac. Norte	Fac. Leste	F. Oeste
Área superfícies (cob. e fachadas)	25,92	10,08	10,08	20,16	20,16
Área de janelas	0	0	4,08	0	0
Área superfícies opacas	25,92	10,08	5,68	20,16	20,16
Transmitância cob. e paredes (U)	0	0	2,48	0	0
Absortividade superf. opacas (α)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Radiação solar na superf. (Wh/m ²)	0	0	291	0	0

	Nº lâmpadas	Potência	Total
Potência de iluminação	10	32	320

	Nº pessoas	Atividade	Total
Pessoas em atividade	4	60	240

Trocas de ar por hora	4
Fluxo de ar (m³/h)	290
Transmitância da janela “U”	5,70
Fator ganho solar janela “Fvn”	0,20
Fator ganho solar parede “Fon”	0,20
Transmissividade do vidro “Evn”	0,88
Condutância lineal U_i (W/m°C)	0
Resistência sup.externa “Rse”	0,04
Taxa de evaporação “Ev”	0,00

