

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO – FAU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO - PPG

Diagrama de Ventilação Natural

Ferramenta de Análise do Potencial da Ventilação Natural no
Estudo Preliminar de Projeto

BRASÍLIA - 2016



Gustavo de Luna Sales

Orientadora
Prof^a. Titular Dr^a. Marta A. Bustos Romero

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E
URBANISMO – PPG | FAU | UNB

Diagrama de Ventilação Natural

Ferramenta de Análise do Potencial da Ventilação Natural
no Estudo Preliminar de Projeto



Aluno

Gustavo de Luna Sales

Orientadora

Prof^a. Titular Dr^a. Marta A. Bustos Romero

Tese apresentada no curso de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Diagrama de Ventilação Natural

Ferramenta de Análise do Potencial da Ventilação Natural no Estudo Preliminar de Projeto



Gustavo de Luna Sales

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dr^a. Marta Adriana Bustos Romero
Prof^a. Titular da Faculdade de Arquitetura e urbanismo / UnB

Dr. Caio Frederico e Silva
Professor da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo / UnB

Dr. Marcos Thadeu Queiroz Magalhães
Professor da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo / UnB

Dr^a. Patrícia Regina Chaves Drach
Professora da Escola Superior de Desenho Industrial da UERJ

Dr. Leonardo Pinto de Oliveira
Professor Titular do Centro Universitário de Brasília / UniCEUB

Agradecimentos

À Pryscylla Lima – pelas horas de leitura e correção da tese; pelos anos de amor, amizade, sorrisos (e gargalhadas); e pelo futuro que nos espera.

À minha orientadora, Prof^a. Marta Romero - por todos os anos de orientação, muita paciência, e apoio.
Ao LaSUS, minha “segunda casa” desde 2010.

Aos amigos, professores e funcionários da FAU / UnB.
À CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

“Qualquer tolo inteligente consegue fazer coisas maiores e mais complexas. É necessário um toque de gênio e muita coragem para ir na direção oposta.”

(Albert Einstein)

Resumo

A presente tese aborda o desenvolvimento do Diagrama de Ventilação Natural (DVN) – ferramenta de análise do potencial da ventilação natural, para favorecer a Qualidade Interna do Ar (QIA) e o Conforto Térmico Passivo (CTP) em projetos de habitações. Parte-se da hipótese de que é possível desenvolver uma ferramenta que proporcione uma análise mais simples, amigável e rápida em comparação com as atuais ferramentas disponíveis, e que seja aplicável durante as primeiras etapas do processo de projeção – mais especificamente, na etapa do Estudo Preliminar (EP). Para tanto, foram levantados na bibliografia sobre o tema os principais fatores externos e internos ao projeto que influenciam o potencial da ventilação natural em termos de QIA e o CTP. Posteriormente foram levantados os parâmetros legais mínimos exigidos pelos Códigos de Edificações e Normas Técnicas referentes à ventilação natural que, juntamente com os fatores externos e internos de projeto, foram transformados em variáveis a serem analisadas pelo DVN. Por fim, foram analisados os principais modelos que atualmente estão disponíveis para a análise da ventilação natural no projeto de arquitetura – modelos analíticos e empíricos, modelos em escala, modelo multizona e de zona, modelos computacionais de dinâmica dos fluidos. Essa análise identificou as principais deficiências das

ferramentas/modelos atuais em termos de aplicação durante a etapa de Estudo Preliminar de Projeto – sendo essas: custo de aplicação, nível de habilidade técnica exigido do usuário, e interface pouco amigável. Assim, para suprir as deficiências apontadas, foi identificado que a ferramenta a ser desenvolvida deveria ser fundamentada nos princípios dos modelos gráficos – que visam justamente à simplificação do problema a ser estudado, a análise das principais variáveis influentes e a obtenção de um diagnóstico/resultados estimado por meio da combinação das variáveis identificadas. Após a estruturação do DVN, foi desenvolvida a ferramenta com linguagem simples, amigável e acessível gratuitamente na rede mundial de computadores. O DVN possibilita a quantificação do potencial da ventilação natural em favorecer a QIA e o CTP, fornece o número de renovações de ar por hora estimado para os ambientes de quarto, sala, cozinha e banheiro, além de informar ao usuário quais os aspectos que o EP cumpre em termos normativos/legais e quais as diretrizes para a melhoria de possíveis problemas.

Palavras-Chave:

Ventilação Natural, Qualidade Interna do Ar, Conforto Térmico Passivo, Ferramenta de Análise, Estudo Preliminar.

Abstract

This thesis describes the development of Natural Ventilation Diagram (NVD) - an analysis tool of the potential of natural ventilation to provide the Indoor Air Quality and Passive Thermal Comfort in the design of residential buildings. It starts with the hypothesis that it is possible develop a tool that provides more simple, user friendly, and faster analysis in comparison with the current available tools - and that is applicable during the first stages of the design process. Have been raised in the literature the major internal and external factors that influence the potential of natural ventilation associated with IAQ and PTC. Afterwards have been identified the minimum legal standards required by the Building Codes and Technical Standards relating to natural ventilation. The legal parameters and external and internal factors were transformed into variables that the user can analyze by the NVD. Finally, were analyzed the main models that are currently available for the analysis of natural ventilation in architectural design – empirical and analytical models, scale models, multizonal and zonal models, computacional computational fluid dynamics models. This analysis identified the main weaknesses of the tools / current models in terms of application for the Preliminary Design

stage process - related to the cost of implementation, technical skill level required of the user, and unfriendly interface. Therefore, to fulfill the identified deficiencies, it was identified that the tool to be developed should be based on the principles of graphical models. The graphics models aim at simplification of the problem to be studied, the analysis of main influential variables and obtaining a diagnostic/result estimated by the combination of the identified variables. After structuring of NVD, it was developed the tool with simple language, friendly and available free on the World Wide Web. The NVD enable quantification of natural ventilation potential, provides an estimation of the number of air change per hour for rooms, living room, kitchen and bathroom. As well as inform the user which aspects meets in regulatory / legal terms and what the guidelines for the improvement of potential problems.

Keywords:

Natural Ventilation, Indoor Air Quality, Passive Thermal Comfort, Analysis Tool, Preliminary Design Process.

Resumen

En esta tesis se describe el desarrollo del Diagrama de Ventilación Natural (DVN) - una herramienta de análisis del potencial de ventilación natural para promover la Calidad del Aire Interior (CAI) y el Confort Térmico Pasivo (CTP) en proyectos de viviendas. La posibilidad de desarrollar una herramienta que proporciona un análisis simple de usar y rápido de usuario, en comparación con las herramientas actuales disponibles, y que es aplicable durante las primeras etapas del proceso de proyeção es la hipótesis inicial. En un primer momento ha planteado en la literatura sobre el tema de los principales factores externos e internos que influyen en la ventilación potencial del proyecto. Después de los estándares legales mínimos aumentaron requeridos por los códigos de construcción y normas técnicas relativas a la ventilación natural. Todos estos parámetros planteados fueron transformadas en variables para ser analizados por la herramienta propuesta. Por último, los principales modelos que están actualmente disponibles se analizaron para el análisis de la ventilación natural en el diseño arquitectónico - modelos analíticos y empíricos, modelos a escala, multi-zona y el modelo de zona, los modelos informáticos de dinámica de fluidos. Este

análisis identifica las principales deficiencias de las / los modelos actuales herramientas en términos de aplicación durante la etapa de diseño preliminar del estudio - a saber: el costo de aplicación, nivel de habilidad técnica requerida del usuario, y la interfaz poco amigable. Para satisfacer las deficiencias identificadas, se identificó que la herramienta que se desarrollen deben estar basadas en los principios de los modelos gráficos. Después de estructuración de lo DVN, se desarrolló la herramienta con un lenguaje sencillo, amable y disponible gratuitamente en la World Wide Web. Lo que permite la cuantificación de la potencial de la ventilación natural en la calidad del aire favor y confort térmico; proporciona el número de renovaciones de aire por hora para la sala de estar, cocina y baño, así como informar al usuario qué aspectos se reúne en términos normativos / legales y cuáles son las pautas para la mejora de los problemas potenciales.

Palabras clave

Ventilación Natural, Calidad del Aire Interior, Confort Térmico Pasivo, Herramienta de Análisis.

| Sumário

Lista de Figuras _____	12
Lista de Quadros _____	18
Lista de Gráficos _____	19
Lista de Tabelas _____	20
Lista de Equações _____	21
Lista de Siglas _____	21
INTRODUÇÃO _____	22
Capítulo 1 – Qualidade Interna do Ar e Conforto Térmico por meio da Ventilação Natural _____	30
OBJETIVOS DO CAPÍTULO 1 _____	31
INTRODUÇÃO _____	32
1. CONCEITO DE QUALIDADE INTERNA DO AR RELACIONADO COM A VENTILAÇÃO NATURAL _____	33
1.1. Qualidade Interna do Ar e a Saúde Humana _____	35
1.1.1. Fatores Externos e Fatores Internos ao Projeto – QIA / Saúde Humana _____	42
1.2. Conforto Térmico Passivo _____	43

1.2.1. Fatores Externos ao Projeto Fatores Climáticos Globais e Locais _____	49
1.2.2. Fatores Externos ao Projeto Densidade de Ocupação e Relação W/H _____	51
1.2.3. Fatores Externos ao Projeto Barreiras de Vento _____	56
1.2.4. Fatores Internos de Projeto Posicionamento, Orientação e Forma do Projeto _____	60
1.2.5. Fatores Internos de Projeto Localização e Tamanho das Aberturas _____	63
1.2.6. Fatores Internos de Projeto Divisões Internas e Profundidade da Planta _____	66
1.2.7. Fatores Internos de Projeto Elementos de Captação e Controle da Ventilação _____	69

Capítulo 2 – Parâmetros Legais para o Estudo Preliminar de Projeto: Ventilação Natural _____	72
OBJETIVOS DO CAPÍTULO 2 _____	73
INTRODUÇÃO _____	74
2. LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO PRELIMINAR DE PROJETO _____	77
2.1. Parâmetros Legais para a QIA – Saúde Humana _____	78
2.1.1. Fatores Externos ao Projeto _____	81

2.1.2.	<i>Fatores Internos ao Projeto</i>	85
2.2.	Parâmetros Legais para o Conforto Térmico Passivo	89
2.2.1.	<i>Fatores Externos ao Projeto – Fatores Climáticos Globais e Locais</i>	89
2.2.2.	<i>Fatores Externos ao Projeto – Relação W/H e a forma dos Volumes Construídos</i>	91
2.2.3.	<i>Fatores Externos ao Projeto – Barreiras de Vento</i>	94
2.2.4.	<i>Fatores Internos ao Projeto – Posicionamento, Orientação e Forma do Projeto</i>	95
2.2.5.	<i>Fatores Internos ao Projeto – Posicionamento, Dimensão e Distribuição das Aberturas</i>	95
2.2.6.	<i>Fatores Internos ao Projeto – Divisões Internas e Profundidade da Planta</i>	101
2.2.7.	<i>Fatores Internos ao Projeto – Elementos de Captação e Controle da Ventilação</i>	101
2.3.	Parâmetros Legais Presentes em Normas e Regulamentações Internacionais	102
2.3.1.	<i>Normas e Regulamentos da União Europeia</i>	103
2.3.2.	<i>Normas e Regulamentos Norte Americanos</i>	107

Capítulo 3 – Modelos e Ferramentas de Predição da Ventilação Natural no Desenvolvimento do Projeto	113
OBJETIVOS DO CAPÍTULO 3	114
INTRODUÇÃO	115
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS MACROSCÓPICOS	120
3.1.1. <i>Modelos Analíticos e Empíricos</i>	120
3.1.2. <i>Modelos Multizona</i>	123
3.1.3. <i>Modelos de Zona Única</i>	128
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS MACROSCÓPICOS	131
3.2.1. <i>Modelos em Escala</i>	131
3.2.2. <i>Modelos Computacionais de Dinâmica dos Fluidos</i>	134
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS GRÁFICOS	138
3.4. QUADRO COMPARATIVO DOS MODELOS APRESENTADOS	142

Capítulo 4 – Desenvolvimento do Diagrama de Ventilação Natural	146
OBJETIVOS DO CAPÍTULO 4	147
INTRODUÇÃO	148
4.1. DEFINIÇÃO DA PONTUAÇÃO E PESOS CATEGORIA 1	152
4.1.1. <i>Escolha da Cidade na qual o Projeto será Inserido</i>	152

4.1.2.	<i>Tipo de Entorno no qual o Projeto será Inserido</i>	154
4.1.3.	<i>Altura Média das Edificações Próximas ao Projeto</i>	157
4.1.4.	<i>Densidade do Entorno do Projeto</i>	159
4.1.5.	<i>Tipo de Vegetação Presente no Entorno do Projeto</i>	161
4.1.6.	<i>Existência de Atividades Prejudiciais à Qualidade do Ar</i>	162
4.2.	DEFINIÇÃO DA PONTUAÇÃO E PESOS CATEGORIA 2	164
4.2.1.	<i>Dimensões de Altura e Afastamento do Projeto em Relação às Edificações Vizinhas</i>	164
4.2.2.	<i>Orientação das Fachadas do Projeto</i>	167
4.3.	DEFINIÇÃO DA PONTUAÇÃO E PESOS CATEGORIA 3	169
4.3.1.	<i>Tipo de Ambiente a ser Analisado</i>	169
4.3.2.	<i>Dimensões do Ambiente a ser Analisado</i>	171
4.3.3.	<i>Tipo de Ambiente a ser Analisado</i>	172
4.3.4.	<i>Altura da Janela em Relação ao Piso do Ambiente e a Função de cada Abertura no Recinto</i>	173
4.3.5.	<i>Tamanho das Janelas (abertura efetiva)</i>	175
4.4.	DEFINIÇÃO DA PONTUAÇÃO FINAL E RESULTADOS	176
4.5.	DEFINIÇÃO DA LINGUAGEM E PROGRAMAÇÃO DO DIAGRAMA DE VENTILAÇÃO NATURAL	179

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	186
CONCLUSÕES GERAIS	187
<i>Sugestões para Trabalhos Futuros</i>	192
REFERÊNCIAL TEÓRICO	194
APÊNDICES	203
APÊNDICE I Desenvolvimento das Simulações Computacionais	204
<i>Procedimento de Simulação das Variáveis do Item 1.3</i>	204
<i>Procedimento de Simulação das Variáveis do Item 1.4</i>	210
APÊNDICE II <i>Mind Map</i> do Diagrama de Ventilação Natural	215
APÊNDICE III Linguagem da Programação do Diagrama de Ventilação Natural	216

| Lista de Figuras

Figura 0. 1 – Ficha Bioclimática para a análise ambiental urbana. Fonte: Romero (2007, p. 195). _____	24
Figura 0. 2 – Modelo gráfico com análise baseada no diagrama das variáveis (também denominado de análise morfológica ou diagrama morfológico), para o projeto de uma máquina de coletar tomates. Fonte: Cross (2000, p. 128). _____	25
Figura 0. 3 – Etapas iniciais do processo de elaboração do projeto de arquitetura. Fonte: adaptado da NBR 13.531. _____	26
Figura 1. 1 – Estrutura que compõe o capítulo. _____	31
Figura 1. 2 – Organização dos elementos que interferem na QIA segundo a localização de sua fonte de emissão. _____	38
Figura 1. 3 - Relação entre a ventilação natural e a concentração de poluentes visando a QIA. Fonte: Allard (2002: pg.03). _____	41
Figura 1. 4 - Relação entre a demanda de energia e a concentração de poluentes visando a QIA em edificações condicionadas artificialmente. Fonte: Allard (2002: pg.04). _____	42
Figura 1. 5 - Fatores Externos ao Projeto e Fatores Internos ao Projeto que comporão os diagramas de análise da ferramenta proposta com relação à QIA – Saúde Humana. _____	43
Figura 1. 6 - Temperaturas de conforto térmico observadas em campo (OBS), previstas em laboratório pelo modelo PMV. Fonte: adaptado de Santamouris (2006; pg. 222) _____	46
Figura 1. 7 - Novo intervalo de conforto a proposto como Norma de Conforto Adaptativo à compor ASHRAE 55 - aplicável para edifícios ventilados naturalmente. Fonte: Santamouris (2006: pg. 222) _____	46
Figura 1. 8 - Fatores Externos ao Projeto e Fatores Internos ao Projeto que comporão os diagramas de análise da ferramenta proposta com relação à QIA – Conforto Térmico _____	48
Figura 1. 9 - À esquerda, diferença entre a temperatura do ar em diferentes microclimas. À direita, diferença no percentual de velocidade do vento em diferentes microclimas. Fonte: Mascaró (1996) - adaptado de Campanhoni (2012). _____	51
Figura 1. 10 - Exemplo de densidades de ocupação diferentes para um mesmo trecho urbano. _____	52
Figura 1. 11 - Relação entre os afastamentos e a recuperação da velocidade do vento. Fonte: adaptado de Lee <i>et al.</i> (1980 <i>apud</i> BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2008) _____	53
Figura 1. 12 - Caracterização dos espaços segundo a relação W/H. Fonte: Romero (2007) _____	54
Figura 1. 13 - Influência das dimensões do edifício no tamanho da esteira. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 57). _____	55
Figura 1. 14 - Classificação simplificada de diferentes formas urbanas e seus impactos sobre a temperatura, umidade e ventos. Fonte: Oke (2006: pg. 11). _____	56

Figura 1. 15 - Estudo do percentual de redução da velocidade do vento em função do tipo e porosidade da superfície vertical. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 62) adaptado de Boutet (1987). _____	57
Figura 1. 16 - Massas vegetais como elementos de obstrução e influenciadores do fluxo de ar. Fonte: Olgyay (1963: pg. 102) _____	58
Figura 1. 17 – Possibilidade de otimização (a) ou obstrução (b) do fluxo de ar por meio da disposição da vegetação em relação ao edifício. Fonte: Priolo (2002: pg. 201) _____	59
Figura 1. 18 – Fluxo de ar sobre o edifício (a); possibilidade de captação do fluxo do ar através da disposição da vegetação (b); obstrução do fluxo indesejado (c). Fonte: Olgyay (1963: pg. 102). _____	59
Figura 1. 19 – Exemplos da locação menos adequada e mais adequada no sítio urbano em relação a ventilação. Fonte: Priolo (2002: pg. 197) _____	61
Figura 1. 20 – Influência do ângulo de incidência do vento sobre o coeficiente de velocidade do ar interno. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 80) adaptado de Aynsley <i>et al.</i> (1977). _____	61
Figura 1. 21 – Influência da forma da planta do projeto no comportamento do fluxo do vento. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg.58) adaptado de Evans (1979) e Boutet (1987). _____	62
Figura 1. 22 – Efeito da localização das aberturas em paredes opostas (em planta e em corte). Fonte: adaptado de Givoni (1976). _____	64
Figura 1. 23 – Avaliação das alterações no campo do vento para diferentes posicionamentos e tamanhos de abertura. Fonte: Drach (2007: pg. 88). _____	65
Figura 1. 24 - À esquerda, modelo com configuração de aberturas que favorecem o maior fluxo do ar interno (entrada =saída). À direita, modelo com configuração de aberturas que favorecem a maior velocidade interna do fluxo do ar (saída > entrada). Fonte: Olgyay (1963: pg. 105). _____	66
Figura 1. 25 – Interferência das divisões internas dos ambientes na velocidade do fluxo de ar. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 81) adaptado de Givoni (1976). _____	67
Figura 1. 26 - Relação entre a distância percorrida pelo fluxo de ar e a redução de sua velocidade. _____	68
Figura 1. 27 – Zona passiva onde é possível trabalhar com estratégias de ventilação e iluminação natural. Fonte: Ratti <i>et al.</i> (2005: pg. 768) _____	68
Figura 1. 28 – Projeções no edifício se configurando como elementos de captação do vento. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 77). _____	69
Figura 1. 29 – Efeito da localização do shed no fluxo de ar interno. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 90) adaptado de Gandemer e Barnaud. (1989). _____	70
Figura 1. 30 – Sistema automatizados de abertura de janelas e controle de venezianas. Fonte: www.specifile.co.za (acesso em 25/02/2014) _____	71
Figura 2. 1 – Estrutura do Capítulo 2 _____	73
Figura 2. 2 - Aspectos envolvidos no desempenho do sistema de ventilação do edifício. Fonte: adaptado de Wouters <i>et al.</i> (2006, p. 286). _____	77

Figura 2. 3 – Zoneamento Bioclimático brasileiro seguindo a NBR 15.220-3. Fonte: NBR 15220-3 adaptado por Campanhoni (2012, p. 46). _____	81
Figura 2. 4 - Etapas iniciais do processo de elaboração do projeto de arquitetura: Fonte: adaptada da NBR 13.531. _____	83
Figura 2. 5 - Comparação entre a área mínima de abertura recomendada para dormitórios, cozinhas, banheiro, pelo CE-DF e área mínima recomendada pela NBR 15220-3. _____	87
Figura 2. 6 – Temperaturas medias anuais no território brasileiro. Fonte: http://www.geocities.ws/neygeo/clima_brasileiro.html (acesso em 10/01/2015). _____	90
Figura 2. 7 - Comparação entre o afastamento lateral mínimo permitido pelo CE-DF, para vãos destinados exclusivamente à ventilação, em relação ao estabelecido com base na relação W/H=1. _____	93
Figura 2. 8 – Subdivisão das regiões do Reino Unido com exigências específicas de projeto – característica dos materiais das vedações verticais e horizontais. Fonte: disponível em: (http://www.planningportal.gov.uk/buildingregulations/). Acesso em 03/03/2014. _____	107
Figura 2. 9 – Ferramenta interativa (modelo 3D) com a qual se pode encontrar informações legais sobre cada elemento da edificação/projeto. Fonte: disponível em: (http://www.planningportal.gov.uk/permission/). Acesso em 03/03/2014 _____	107

Figura 2. 10 - Mapa de áreas com exigências especiais de projeto em relação às características do vento. Fonte: IRC (2012, p. 36). _____	109
Figura 2. 11 - Mapa das diferentes Zonas de Vento. Fonte: IRC (2012, p. 35). _____	110
Figura 3. 1– Estrutura que compõe o Capítulo 3 _____	114
Figura 3. 2 - Hierarquia dos conceitos de Método – Modelo – Ferramenta, e o recorte definido para a presente tese. _____	116
Figura 3. 3 - Organização dos modelos de análise e predição em termos de aplicação. _____	117
Figura 3. 4 - Etapas do processo de projeto em relação ao sistema de ventilação apresentadas por Heiselberg <i>et al.</i> (1998) _____	118
Figura 3. 5 - Representação gráfica da equação de Fitzgerald e Woods, com relação ao fluxo de ar uniforme em um recinto aquecido na base e ventilado por duas aberturas. Fonte: adaptado de Fitzgerald e Woods (2008, p. 1720) _____	122
Figura 3. 6 - Representação, em planta, do princípio da malha de nós referente aos modelos multizona. _____	124
Figura 3. 7 - Representação do edifício no programa CONTAM – modelo multizona. Fonte: adaptado de Dols (2001, p. 36 e 37). _____	126
Figura 3. 8 - Geometria, em corte, do estudo de caso feito por Axley (2006) – analisado no programa LoopDA. Fonte: adaptado de Dols e Emmerich (2003, p. 18 e 20) _____	126

- Figura 3. 9 - Interface do usuário no programa COMIS com o IISBat (acima) e XCOMIS (abaixo). Fonte: adaptado de Feustels e Smith (1998, p. 25 e 26). _____ **127**
- Figura 3. 10 - Comparação entre modelos em um mesmo estudo de caso – descrição detalhada do modelo de zona única. Fonte: adaptado de Axley (2006, p. 76 e 77). _____ **129**
- Figura 3. 11 - Exemplos de análise em túnel vento –utilizando ar (a); análise em túnel de vento – utilizando fumaça (b); análise em mesa d’água – utilizando água com adição de sabão (c); análise em túnel de vento – utilizando óleo (d).Fonte: (a - <http://www.bmt.org/markets/buildings-infrastructure-and-rail/wind-tunnel-testing/>), (b - <http://architecturaldesigner.dk/>); (c – Toledo e Pereira, 2003, p.1388), (d - http://www.nasa.gov/centers/ames/multimedia/images/2012/iotw/FAIT_H_hill.html#.U2oVwfldW4k). _____ **132**
- Figura 3. 12 - Representação do nível de detalhamento do modelo físico (edifício e entorno) analisados em túnel de vento. Fonte: adaptado de Faria (2012, p. 184) _____ **133**
- Figura 3. 13 - Discretização de um estudo de caso (veículo) por meio do método de volumes finitos – modelo CFD. Fonte: adaptado de ESSS (2012). _____ **135**
- Figura 3. 14 - Estudo de escoamento da ventilação natural no espaço urbano. Fonte: Souza (2006, pg 96). _____ **136**
- Figura 3. 15 - Estudo de distribuição e velocidade do fluxo de ar interno em unidade do Centro de Visitantes Flutuante do ICMBio. Fonte: Sales (2013). _____ **136**
- Figura 3. 16 – No modelo gráfico indireto (à esquerda), “C” depende de “A”, que depende de “D”, que depende de “B” que depende de “C”. No modelo gráfico direto (à direita), “C” depende de “A” e “B” – que são independentes. Fonte: Jordan (1998, p. 14). _____ **139**
- Figura 3. 17 - Formas de aplicação dos modelos gráficos (diretos). Fonte: Jordan (1998, p. 06). _____ **139**
- Figura 3. 18 – (A) Rede de Bayesian simples mostrando duas potenciais doenças (tuberculose e pneumonia) que podem ter provocado infiltração pulmonar no paciente – sendo que a tuberculose deve ser comprovada por meio de exame de escarro, enquanto que a pneumonia deve ser comprovada por meio de Raio X. (B) Rede de Markov simples, descrevendo o *status* da tuberculose em quatro pacientes – em que a ligação entre pacientes indica qual deles teve contato com o outro. Ao lado dos modelos (A) e (B), interpretação traduzida para tabelas de probabilidade condicional – linguagem da probabilidade pela qual os modelos fornecerão suas análises. _____ **140**
- Figura 3. 19 - Modelo gráfico com análise baseada no diagrama das variáveis (também denominado de análise morfológica ou diagrama morfológico), para o projeto de uma máquina de coletar tomates. Fonte: Cross (2000, p. 128). _____ **140**
- Figura 3. 20 - Ficha Bioclimática para a análise ambiental urbana. Fonte: Romero (2007, p. 195). _____ **141**

Figura 4. 1 Estrutura que compõe o Capítulo 4 _____	147
Figura 4. 2 – Estruturação da página de Apresentação e Início do DVN. 1 – Introdução e explicação dos objetivos do DVN; 2 – link para informações completas sobre o DVN; 3 – campo de escolha da cidade na qual o projeto a ser analisado será inserido. _____	180
Figura 4. 3 – Estrutura das páginas de Preenchimento de Informação. 1 – Categorias de Análise; 2 – Cidade selecionada para a análise do projeto; 3 – Itens de análise da Categoria; 4 – Campo que leva à próxima categoria após o usuário ter preenchido todas as variáveis. _____	180
Figura 4. 4 – Variáveis do Item 1.1 Tipo de Entorno no qual o Projeto será Inserido. (A) Entorno Rural; (B) Entorno Suburbano; (C) Entorno Urbano. _____	181
Figura 4. 5 - Variáveis do Item 1.2 Altura Média das Edificações próximas ao Projeto. (A) Edificações até 2 pavimentos; (B) Edificações entre 3 e 6 pavimentos; (C) Edificações com mais de 6 pavimentos. _____	181
Figura 4. 6 - Variáveis do Item 1.3 Densidade do Entorno do Projeto. (A) Entorno pouco denso; (B) Entorno denso; (C) Entorno muito denso. _____	181
Figura 4. 7 - Variáveis do Item 1.4 Tipo de Vegetação Presente no Entorno do Projeto. (A) Entorno sem vegetação; (B) Entorno com vegetação de pequeno, médio e grande porte; (C) Entorno com vegetação densa e de grande porte. _____	181
Figura 4. 8 - Variáveis do Item 1.5 Existência de Atividades Prejudiciais à Qualidade do Ar. (A) Industrias com emissão de gases; (B) Aterros sanitário; (C) Estação de tratamento de esgoto; (D) Estradas ou lotes não pavimentados; (E) nenhuma das anteriores. _____	182
Figura 4. 9 - Variáveis do Item 2.1 Dimensões do Projeto em Relação às Edificações Vizinhas. (A) Altura estimada do projeto; (B) Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral direita); (C) Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral esquerda); (D) Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (fundos) (E); Não existem edificações vizinhas. _____	182
Figura 4. 10 - Variáveis do Item 2.2 Orientação das Fachadas do Projeto a ser Analisado. (A) Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Leste-Oeste; (B) Planta quadrada ou circular; (C) Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Norte-Sul. _____	183
Figura 4. 11 - Variáveis do Item 3.1 Ambiente a ser Analisado. (A) Sala; (B) Quarto; (C) Banheiro; (D) Cozinha. _____	183
Figura 4. 12 - Variáveis do Item 3.2 Dimensões do Ambiente a ser Analisado. (A) Largura; (B) Pé-Direito; (C) Profundidade. _____	184
Figura 4. 13 - Variáveis do Item 3.3 Posicionamento da(s) Janela(s) no Ambiente a ser Analisado. (A) Janela posicionada em uma parede; (B) Janelas posicionadas em duas paredes adjacentes; (C) Janelas posicionadas em duas paredes opostas; (D) Ambiente sem janela. _____	184
Figura 4. 14 - Variáveis do Item 3.4 Altura da(s) abertura(s) em relação ao piso e a função de cada abertura. (A) Janela baixa; (B) Janela média; (C) Janela alta. _____	184

Figura 4. 15 - Variáveis do Item 3.5 | Área de Abertura Efetiva da(s) Janela(s) no Ambiente a ser Analisado e a sua Altura em Relação ao Solo. (A) Área da entrada de ar (e sua altura em relação ao solo); (B) Área da saída de ar (e sua altura em relação ao solo). _____ **184**

Figura 4. 16 – Estrutura da Página do Resultado Final de análise do ambiente. 1 – pontuação do ambiente e potencial de aproveitamento da ventilação natural; 2 – número de RAH estimado para o ambiente analisado; 3 – campo de possíveis alertas e diretrizes de projeto a serem verificados pelo usuário. _____ **185**

Figura A. 1 – Modelo desenvolvido para a representação do Cenário 1 do Item 1.3. _____ **204**

Figura A. 2 – Inserção do domínio ao redor dos sólidos criados. ____ **204**

Figura A. 3 – Exemplo de malha gerada no programa ANSYS para as simulações dos cenários do Item 1.3. _____ **206**

Figura A. 4 – Detalhes dos parâmetros utilizados na geração das malhas. _____ **206**

Figura A. 5 – Exemplo de Inserção dos parâmetros do domínio. ____ **207**

Figura A. 6 – Exemplo dos parâmetros físicos aplicados ao domínio. **208**

Figura A. 7 – Exemplo dos resultados obtidos quanto à velocidade de escoamento do fluido. (A - perspectiva) destaque para as *isocores* sobre o volume de referência informando a quantificação da velocidade média sobre as faces. (B - planta) resultado geral obtido para o Cenário 1. _____ **209**

Figura A. 8 – Exemplo da tabela de resumo dos resultados fornecida pelo relatório final do programa. Destaque para o resultado da velocidade média nas faces X, Y e Z do volume de referência. _____ **209**

Figura A. 9 – Exemplo do posicionamento dos sólidos em relação ao volume de interesse, cenário 2. _____ **211**

Figura A. 10 - Inserção do domínio ao redor dos sólidos criados. ____ **212**

Figura A. 11 - Exemplo de malha gerada no programa ANSYS para as simulações dos cenários do Item 1.4. _____ **212**

Figura A. 12 – Exemplo dos resultados obtidos no cenário 2 (A) e no cenário 4 (B) para a velocidade de escoamento do fluxo de ar conforme a densidade do entorno. _____ **213**

| Lista de Quadros

Quadro 1. 1- Fatores Climáticos que influenciam a QIA em relação ao conforto térmico natural, no projeto. Fonte: adaptado de Romero (2007). _____	49
Quadro 1. 2- Alterações observadas entre o microclima urbano e rural. Fonte: adaptado de Landsberg (1970 <i>apud</i> ROMERO, 2007) e Allard e Alvarez (2002). _____	50
Quadro 1. 3- Aspectos relacionados com a forma do projeto/edifício e suas implicações. _____	62
Quadro 2. 1 - Parâmetros de referência identificados em termos de Fatores Externos de Projeto QIA – saúde humana _____	84
Quadro 2. 2 - Parâmetros identificados em termos de Fatores Internos de Projeto QIA – saúde humana. _____	89
Quadro 2. 3 - Parâmetros identificados em termos de Fatores Externos ao Projeto CTP. _____	91
Quadro 2. 4 - Afastamentos mínimos em relação às divisas de lotes e de paredes confrontantes a serem cumpridos por edificações de até 3 pavimentos. Fonte: adaptado do CE-DF. _____	92
Quadro 2. 5 - Parâmetros identificados em termos de Fatores Externos ao Projeto CTP. _____	93
Quadro 2. 6 – Diretrizes de projeto propostas pela NBR 15220-3. Fonte: adaptado da NBR 15220-3. _____	97

Quadro 2. 7 – Especificação do tamanho da abertura. Fonte: adaptado da NBR 15220-3. _____	97
Quadro 2. 8 – Determinação do tamanho da abertura para o desempenho mínimo da ventilação em habitações. Fonte: adaptado da NBR 15575-4. _____	97
Quadro 2. 9 - Parâmetro identificado em termos de Fatores Internos ao Projeto CTP. _____	100
Quadro 2. 10 - Parâmetro identificado em termos de Fatores Internos ao Projeto CTP. _____	101
Quadro 2. 11 - Comparação entre os parâmetros de dimensionamento das aberturas em países europeus. Fonte: adaptado de Wouters <i>et al.</i> (2006, p. 293). _____	106
Quadro 2. 12 - Parâmetros gerais de projeto relacionados com a ventilação natural identificados na IRC. Fonte: adaptada da IRC (2012). _____	111
Quadro 3. 1 - Relação entre o processo de projeto e os modelos de predição e análise da ventilação. Fonte: adaptado de Heiselberg <i>et al.</i> (1998, p. 23) _____	119

| Lista de Gráficos

Gráfico 1. 1 - Histórico das taxas de ventilação recomendadas. _____ 44

Gráfico 2. 1 – Ano de publicação dos CE's _____ 80

Gráfico 2. 2 - Percentual de abertura efetiva identificados nos CE's. _ 86

Gráfico 2. 3 – Alturas máximas de muros permitidas pelos CE's das capitais brasileiras. Sendo considerado "0" nos CE's que não fixando exigências claras. _____ 94

Gráfico 2. 4 – Afastamentos mínimos das aberturas de ventilação e iluminação em relação aos muros de divisa de lote fixados pelos CE's das capitais brasileiras. Sendo considerado "0" nos CE's que não fixando exigências claras _____ 94

Gráfico 2. 5 - Fração mínima de abertura por ambiente estipulada pelos CE's nas capitais brasileiras. Sendo considerado "0" nos CE's que não fixam exigências claras _____ 96

Gráfico 2. 6 - Área mínima do vão para ventilação estipulada pelos CE's das capitais brasileiras. Sendo considerado "0" nos CE's que não fixam exigências claras. _____ 99

Gráfico 2. 7 - Fluxo mínimo de ar por pessoa exigido em normas para habitações em países da UE. Fonte: adaptado de Wouters *et al.* (2001, p. 289). _____ 105

Gráfico 3. 1 - Percentual de modelos utilizados para a predição da ventilação (natural ou artificial) em trabalhos publicados somente no ano de 2007. Fonte: adaptado de Chen (2009, p.855) _____ 137

| Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 – Parâmetros de referência para o dimensionamento de aberturas por tipo de ambiente conforme o COE-DF. _____	85
Tabela 2. 2 – Comparação entre os parâmetros de tamanho de abertura presentes no COE-DF e na NBR 15220-3. _____	87
Tabela 2. 3 – Parâmetros legais quanto ao nível de concentração de poluentes presentes na RE n°09 da ANVISA para QIA – Saúde Humana. _____	89
Tabela 2. 4 – Valores de referência de alguns poluentes no ar em relação ao tempo de exposição máximo (CIB, 2004). _____	103
Tabela 2. 5 – Valores de referência de concentração de fungos, bactérias e alérgenos no ar em ambientes residenciais (CEC, 1993). _____	103
Tabela 3. 1 - Quantificação dos modelos de análise e predição em relação aos parâmetros estabelecidos. _____	144
Tabela 4. 1– Dados de Intensidade do Vento segundo as NCB/INMET (1961 – 1990) para cada cidade escolhida. _____	152
Tabela 4. 2 - Parâmetros de terreno para as classes de terreno padrão. Fonte: adaptado de Swami e Chandra (1987) _____	154
Tabela 4. 3 – Opções do DVN e seus respectivos valores conforme a classe do terreno. _____	155

Tabela 4. 4 – Pontuação do item 1.2 para cada variável. _____	156
Tabela 4. 5 – Pontuação do item 1.3 para cada variável. _____	159
Tabela 4. 6 - Pontuação do item 1.4 para cada variável _____	160
Tabela 4. 7 – Pontuação do item 1.5 para cada variável _____	162
Tabela 4. 8 - Pontuação do item 1.5 para cada variável. _____	164
Tabela 4. 9 - Pontuação do item 2.1 para cada variável. _____	166
Tabela 4. 10 – Pontuação do item 2.2 para cada variável. _____	168
Tabela 4. 11 - Pontuação do item 3.1 para cada variável. _____	170
Tabela 4. 12 - Pontuação do item 3.3 para cada variável. _____	173
Tabela 4. 13 - Pontuação do item 3.4 para cada variável. _____	175
Tabela 4. 14 – Níveis do potencial de aproveitamento da ventilação natural adotados no DVN. _____	177
Tabela 4. 15 – Alertas e diretrizes do DVN dos possíveis itens a serem selecionados pelo usuário. _____	178

Tabela A. 1 – Resultados das simulações dos cenários do Item 1.3. Em verde, valores acima de 70% da velocidade inicial do fluxo de ar (m/s); em amarelo valores < 70% e > 50%; e em laranja valores <50%. _____	210
Tabela A. 2 - Resultados das simulações dos cenários do Item 1.4. Em verde, valores acima de 70% da velocidade inicial do fluxo de ar (m/s); em amarelo valores < 70% e > 50%; e em laranja valores <50% _____	213

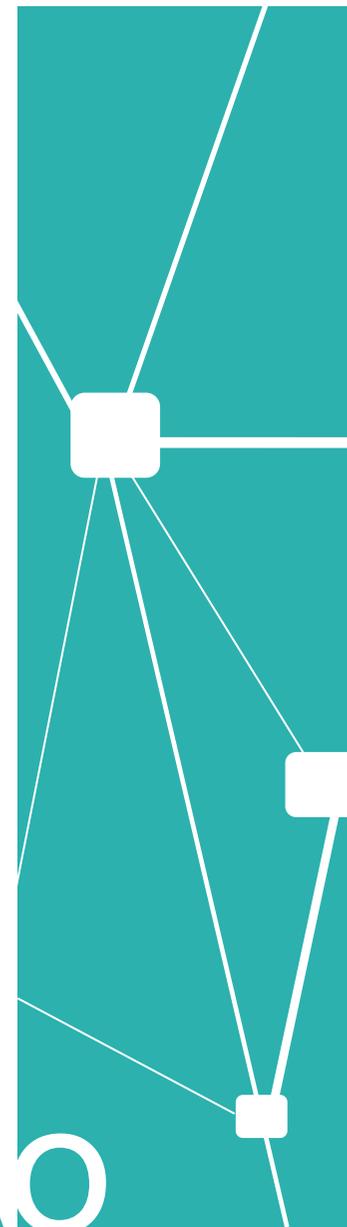
| Lista de Equações

Equação 1. 1 _____	52
Equação 3. 1 _____	121
Equação 3. 2 _____	122
Equação 3. 3 _____	123
Equação 4. 1 _____	153
Equação 4. 2 _____	153
Equação 4. 3 _____	153
Equação 4. 4 _____	153
Equação 4. 5 _____	153
Equação 4. 6 _____	154
Equação 4. 7 _____	154

| Lista de Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE -
CE – Código de Edificações
CTP – Conforto Térmico Passivo
DVN – Diagrama de Ventilação Natural
FEP – Fatores Externos ao Projeto
FIP – Fatores Internos ao Projeto
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
QIA – Qualidade Interna do Ar
NBR – Norma Técnica Brasileira
SED – Síndrome do Edifício Doente
IRC – Código Residências Internacional

INTRODUÇÃO





INTRODUÇÃO |

A presente tese aborda o processo de desenvolvimento de uma ferramenta de análise do potencial de aproveitamento da ventilação natural aplicável à etapa de Estudo Preliminar do projeto de habitações no Brasil. Parte-se da premissa de que as atuais ferramentas disponíveis para tal tipo de análise apresentam deficiências que limitam seu acesso durante as etapas iniciais do projeto de arquitetura, tais como: o custo de aquisição, habilidades técnicas e operacionais requeridas dos usuários e a ausência de dados completos no início do projeto.

Por exemplo, as análises do fluxo de ar em modelos computacionais de dinâmica dos fluidos (CFD) envolvem um custo considerável desde a aquisição do software específico, treinamento do usuário, até a aquisição de equipamentos (processador, placa de vídeo, etc.). Envolvem, ainda, um determinado tempo entre treinamento, construção do modelo virtual, processamento dos resultados e análise dos dados de saída. Tempo esse que, dependendo da precisão dos resultados e da habilidade do usuário, possui impacto no custo das simulações. Por fim, os modelos CFD requerem a inserção de

dados mais precisos para a obtenção de resultados confiáveis (próximos à situação real que se deseja analisar) – motivo principal de sua utilização. Ocorre que, durante as etapas iniciais do projeto, informações precisas na construção do modelo e demais dados de entrada podem não estar disponíveis ou ainda serem passíveis de alteração até projeto executivo. Todos esses fatores limitam a aplicação dos modelos CFD durante as etapas iniciais do processo de projeto.

Por outro lado, os modelos tecnologicamente simples, de baixo custo, e com flexibilidade para possíveis alterações durante o desenvolvimento do projeto, requerem dos usuários uma significativa habilidade e conhecimento matemático – aspectos consideravelmente facilitados nos modelos computacionais. Os modelos analíticos e empíricos baseiam-se em um ramo específico da matemática: o cálculo. De forma geral, tal ramo do conhecimento é abordado superficialmente durante a formação acadêmica do arquiteto. Além disso, os resultados obtidos por meio de modelos matemáticos são pontuais e não são representados de forma gráfica, ou seja, não facilitam a observação e análise dos resultados. Por exemplo, a visualização do comportamento das variáveis que influenciam o conforto térmico é fundamental para que haja melhor compreensão das



diretrizes que devem ser adotadas pelo projetista no processo criativo, como aborda Dutra e Yannas (2006) e Kowaltowski *et al.* (2006).

Dessa forma, a presente tese justifica o desenvolvimento de uma ferramenta de análise que, baseando-se nos modelos gráficos, consiga suprir algumas lacunas deixadas pelas demais ferramentas/modelos existentes. Seja em forma de esquemas, desenhos, figuras, símbolos, etc., a representação dos diagramas nesses modelos se caracteriza por comprimir e tornar legível uma determinada quantidade de informações e variáveis. Assim, “deixam de lado complexidades reais” para possibilitar ao projetista a análise e o desenvolvimento de alternativas para determinadas situações, como destaca Barki (2006). A análise se dá por meio da identificação de cada variável do diagrama em relação ao objeto de estudo, obtendo-se o diagnóstico por meio da somatória dos resultados das variáveis.

Variações do modelo gráfico já são utilizadas no campo da arquitetura para a análise de aspectos ambientais, como, por exemplo, no conforto ambiental. Como exemplos que se enquadram nesse tipo de modelo, podem ser citados: a Carta Solar, fichas Bioclimáticas (ROMERO, 2007) (Figura 0. 1), Quadros de Mahoney (UNITED NATIONS, 1971), e o Diagrama

Morfológico para a análise da iluminação natural (BAKER *et al.*, 1993; IKEDA, 2012).

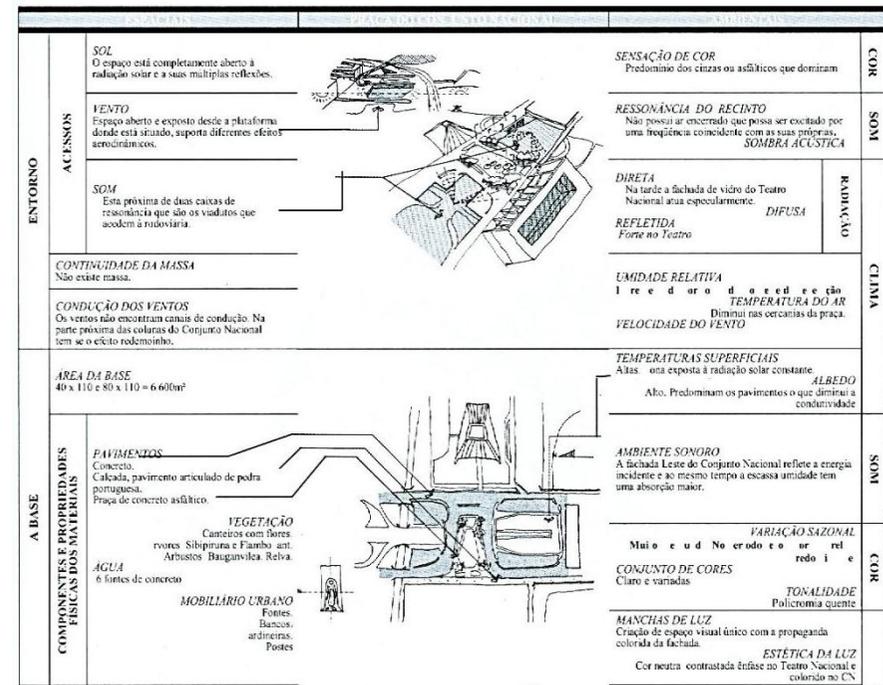
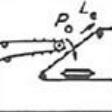


Figura 0. 1 – Ficha Bioclimática para a análise ambiental urbana. Fonte: Romero (2007, p. 195).



Além dos exemplos citados para o campo da arquitetura, modelos gráficos são amplamente utilizados por outras áreas do conhecimento, como a medicina, a biologia e a engenharia da produção. Por exemplo, para o desenho de produtos, Cross (2000) propôs a “Análise Morfológica” por meio de diagramas que auxiliam na formação do produto a partir de elementos essenciais, dispondo esses elementos em forma de diagrama em uma matriz que reúne todas as ideias do projeto (Figura 0. 2).

Quando se trata de uma análise inicial sobre um objeto em fase de desenvolvimento, como é o foco da presente tese, é importante que se considere que a ferramenta irá auxiliar o profissional em termos identificação de problemas e definição de diretrizes para que o produto tenha um melhor desempenho. Não sendo posta como pretensão, portanto, a substituição de ferramentas mais precisas e aplicáveis em etapas posteriores. Ou seja, espera-se a complementação de um processo a fim de reduzir custos, tempo de análise, e contribuir para o desenvolvimento do produto.

Solutions		1	2	3	4	...
Sub-functions						...
1	Lift	 and pressure roller	 and pressure roller	 and pressure roller	 Pressure roller	...
2	Sift	 Sifting belt	 Sifting grid	 Sifting drum	 Sifting wheel	...
3	Separate leaves			 Plucker
4	Separate stones					...
5	Sort potatoes	by hand	by friction (inclined plane)	checkalls (hole gauge)	check mass (weighing)	...
6	Collect	Tipping hopper	Conveyor	Sack-filling device

↓ Combination of principles Cominação dos Princípios

Figura 0. 2 – Modelo gráfico com análise baseada no diagrama das variáveis (também denominado de análise morfológica ou diagrama morfológico), para o projeto de uma máquina de coletar tomates. Fonte: Cross (2000, p. 128).



Assim, a hipótese levantada nesta tese é a possibilidade de desenvolvimento de uma ferramenta de análise do potencial da ventilação natural em habitações brasileiras, que seja simples, acessível e amigável ao usuário – voltada para auxiliar o desenvolvimento das primeiras etapas do processo de projeto arquitetônico.

Partindo dessa hipótese, foi realizado levantamento do referencial teórico sobre os modelos utilizados para a análise da ventilação natural em edifícios. De início identificou-se que, tendo em vista a hipótese a ser comprovada, não cabia, nesse trabalho abordar modelos referentes ao método de medição da ventilação natural, uma vez que esse é aplicável em espaços construídos e não no processo de projeto.

A própria definição do conceito de “processo de projeto” ou “etapa inicial de projeto” foi importante para o desenvolvimento da tese, o que levou a delimitação do tema ao Estudo Preliminar de Projeto – conforme caracterizado pela NBR 13.531 (ABNT, 1995) (Figura 0. 3). A descrição mais detalhada da etapa do Estudo Preliminar é abordada no decorrer da tese. Na sequência, foi realizado o levantamento dos principais autores que abordam o tema, utilizando as palavras-chave: “ventilação

natural”, “modelos de previsão”, “conforto térmico passivo”, entre outras.

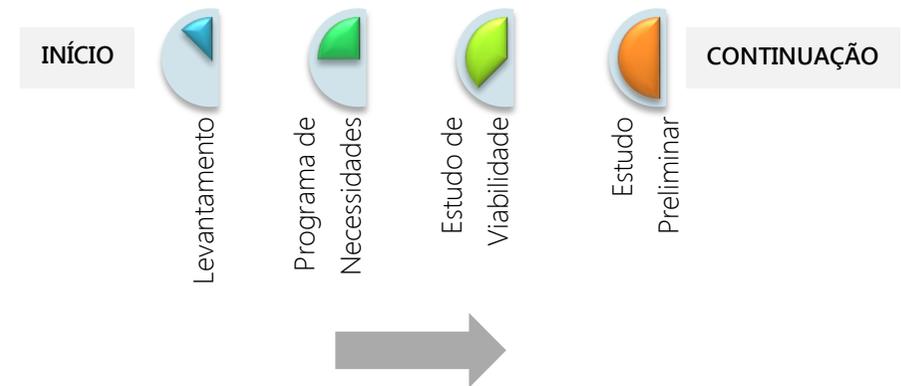


Figura 0. 3 – Etapas iniciais do processo de elaboração do projeto de arquitetura. Fonte: adaptado da NBR 13.531.

Foi identificado que a legislação específica que disciplina e orienta o processo de desenvolvimento do projeto também é um fator fundamental para a comprovação da hipótese estabelecida – uma vez que os parâmetros legais são importantes aspectos a serem considerados no início do projeto. Dessa forma, a ferramenta proposta também se configura como



ferramenta de auxílio ao projeto sob o ponto de vista legal – no que concerne à ventilação natural. Assim, foi realizado o levantamento e análise dos principais documentos legais que versam sobre parâmetros da ventilação natural que devem ser cumpridos pelo projetista, sendo eles: Código de Edificações (CE's) e Normas Técnicas (NBR's) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Além disso, buscou-se a identificação de ações e exemplos de referência para o trabalho em legislações internacionais – de países com destacada liderança no desenvolvimento de normas e regulamentos que abordam a QIA e o CTP em habitações.

Ao analisar a legislação específica brasileira, uma palavra recorrente se destacou: “qualidade”. Incutida nos textos consultados durante a formação do referencial teórico, a palavra “qualidade” se transformou no conceito de “Qualidade Interna do Ar” (QIA), que aborda a saúde dos usuários no interior da edificação. A QIA proporcionada pela ventilação natural ainda é uma área em desenvolvimento no contexto internacional e, até o momento, pouco conhecida no Brasil (Gioda e Neto, 2003). Portanto, trabalhar esse conceito no campo da arquitetura e urbanismo ao nível nacional atribui um caráter inovador à presente tese. Além da QIA, buscou-se a incorporação do

conforto térmico passivo (CTP) para o desenvolvimento da ferramenta de análise – tendo em vista o considerável potencial da ventilação natural em favorecer o resfriamento passivo no Brasil exposto pela norma NBR 15.220-3.

Por fim, ficou evidente a necessidade de se abordar o conceito de QIA e de CTP e seus principais fatores influentes, bem como, a identificação das exigências legais envolvidas no desenvolvimento do projeto. Dessa forma, a elaboração da ferramenta proposta partiu da identificação dos fatores de projeto (relacionados com o favorecimento da QIA e CTP por meio da ventilação natural), e dos parâmetros de referência legais (influentes na QIA e no CTP) que devem ser cumpridos pelo Estudo Preliminar.

Portanto, a ferramenta proposta é destinada ao auxílio do desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto, visando não somente a quantificação do potencial de aproveitamento da ventilação natural -, mas também, o favorecimento da QIA e CTP levando-se em consideração a realidade climática brasileira. No atual formato da ferramenta, foi possível desenvolver um



algoritmo¹ que considera os dados climáticos, normativos e legais de sete cidades brasileiras – Belém, Brasília, Curitiba, Goiânia, São Paulo e Teresina.

Para o desenvolvimento do algoritmo do DVN foram utilizados modelos analíticos e empíricos, modelos computacionais de dinâmica dos fluidos, e parâmetros de referência identificados na revisão bibliográfica abordada nos capítulos 1 e 2. Este conjunto de métodos foi fundamental para a criação do sistema de pontuação, pesos e restrições do DVN.

Assim, a estrutura da tese está estabelecida da seguinte forma:

- **CAPÍTULO 1** – objetiva apresentar e abordar os conceitos relacionados com a ventilação natural em termos de Qualidade Interna do Ar (QIA) e Conforto Térmico Passivo (CTP) utilizados na presente tese. Estes conceitos foram levantados na bibliografia de autores consagrados e documentos oficiais da instituição de referência sobre o tema.

¹ Algoritmo consiste em uma sequência finita de regras que permite solucionar um problema ou cumprir um número finito de etapas (CRUZ, 1997).
<http://equipe.nce.ufrj.br/adriano/c/apostila/algoritmos.htm>

Além disso, visa identificar os principais fatores externos e internos de projeto relacionados ao desenvolvimento do Estudo Preliminar que influenciam o potencial da ventilação natural em favorecer a QIA e o CTP. Esses fatores comporão parte das variáveis a serem analisadas pelo Diagrama de Ventilação Natural.

- **CAPÍTULO 2** – objetiva identificar os parâmetros legais relacionados com a QIA e o CTP presentes na legislação específica do Distrito Federal aplicáveis ao desenvolvimento do Estudo Preliminar de projeto. Também objetiva analisar quais desses parâmetros tornar-se-ão variáveis de projeto para compor os diagramas da ferramenta proposta. Essa análise é baseada na comparação dos documentos legais do Distrito Federal em relação às Normas Técnicas e Códigos de Edificações das demais capitais brasileiras, e em relação a documentos legais internacionais que se destacam sobre o tema.
- **CAPÍTULO 3** – objetiva analisar e caracterizar os atuais modelos utilizados para a predição da



ventilação natural, elencando suas limitações quanto à aplicação durante o Estudo Preliminar de projeto em relação aos fatores e parâmetros de referência identificados nos Capítulos 1 e 2. A partir da exposição das limitações, são abordados os modelos diagramáticos – seus princípios, vantagens e limitações – como base para o desenvolvimento da ferramenta proposta na tese.

- **CAPÍTULO 4** – aborda o processo de desenvolvimento do Diagrama de Ventilação Natural, em que os fatores de projeto e parâmetros legais se tornam variáveis/diagramas. Esses diagramas foram organizados de forma hierárquica em três “Categorias”, vinte e oito “Itens” e quarenta e quatro “Variáveis” – que compõem o sistema de análise do potencial de aproveitamento da ventilação natural. No capítulo são descritos dos procedimentos de quantificação da pontuação de cada variáveis da ferramenta e o algoritmo de análise da ferramenta. Por fim, aborda o desenvolvimento da programação visual e linguagem do DVN.
- **CAPÍTULO 5** – conclusão da tese, abordando-se os principais benefícios da utilização da ferramenta desenvolvida e as possíveis limitações da sua utilização. Aborda, ainda, os próximos passos para a evolução da ferramenta e objetos de estudo sobre o tema que podem servir para o desenvolvimento de pesquisas por parte de outros autores.
- **APÊNDICE** – apresenta o processo de determinação da pontuação das variáveis simulados no modelo CFD (programa ANSYS CFX), expõe um *Mind Map* do sistema de categorias, itens e variáveis do DVN, além de apresentar a linguagem de programação computacional da ferramenta.

CAPÍTULO 1

Qualidade Interna do Ar e Conforto Térmico por meio da Ventilação Natural

Resumo do Capítulo

Este capítulo aborda as delimitações adotadas pela presente tese para os conceitos de qualidade interna do Ar (QIA) e conforto térmico passivo (CTP). Esses conceitos se caracterizam fundamentalmente por: assegurar condições de saúde humana e promover o conforto térmico dos ocupantes no interior da edificação. Dessa forma, é fundamental que o projeto de arquitetura que objetive favorecer níveis adequados de QIA e CTP, por meio da ventilação natural, considere os fatores relacionados à saúde humana e ao conforto térmico desde as primeiras etapas do seu desenvolvimento. Após a apresentação desses conceitos e a introdução ao tema, são abordados os fatores envolvidos na QIA e no CTP (fatores esses que foram identificados com base na revisão da bibliografia sobre o tema), bem como a forma pela qual a ventilação natural se relaciona com os mesmos. O principal balizador para a escolha dos fatores apresentados foi a possibilidade de o projetista adotar ações e diretrizes em relação a esses durante o Estudo Preliminar. Propõe-se a classificação desses fatores em “Fatores Externos ao Projeto” e “Fatores Internos ao Projeto”, a fim de se organizar as variáveis envolvidas que serão consideradas durante o desenvolvimento do projeto. Referidos fatores compõem o Diagrama de Ventilação Natural (DVN).



OBJETIVOS DO CAPÍTULO 1

O objetivo geral deste capítulo é apresentar os conceitos de Qualidade Interna do Ar e Conforto Térmico Passivo, adotados pela presente tese, relacionando-os à ventilação natural e à caracterização dos seus fatores influentes – os quais devem ser considerados no desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto.

Os objetivos específicos são:

1. Identificação, caracterização e organização dos Fatores Externos e dos Fatores Internos ao Projeto, influentes na QIA relacionada à saúde humana;
2. Identificação, caracterização e organização dos Fatores Externos e dos Fatores Internos ao Projeto, influentes no CTP relacionado ao conforto humano;
3. Definição de variáveis de projeto que compõem parte dos diagramas de análise da ferramenta proposta.

O presente capítulo segue a sequência da estrutura indicada na (Figura 1. 1).

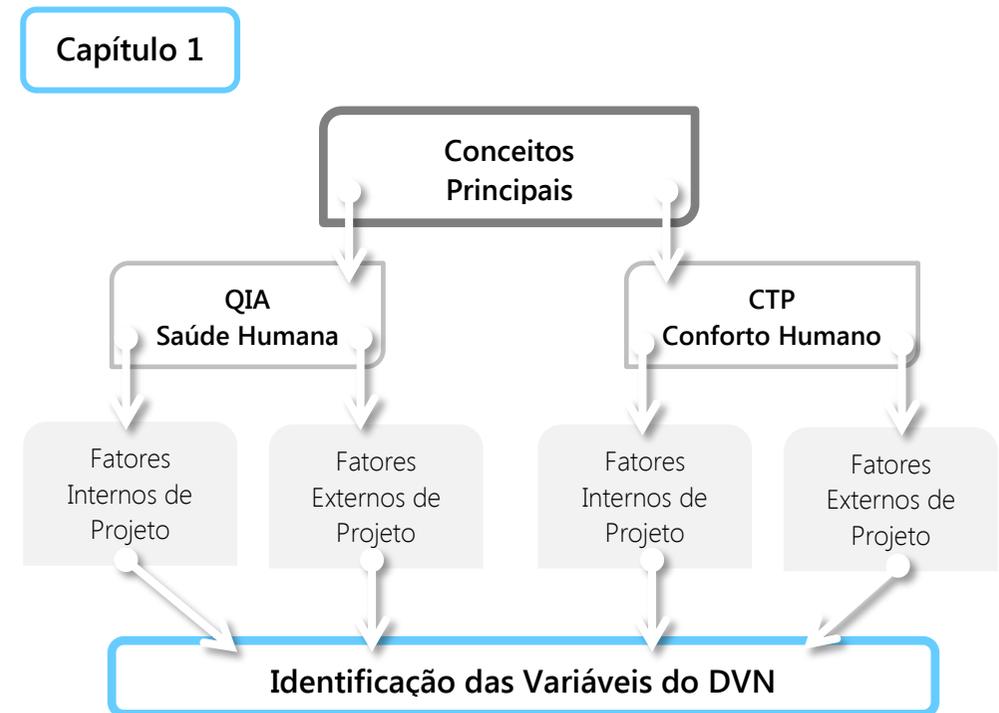


Figura 1. 1 – Estrutura que compõe o capítulo.



INTRODUÇÃO

A ventilação natural pode ser definida como o movimento do ar causado pela diferença de pressão e/ou diferença de temperatura. Possui como principal propósito a introdução de ar limpo em um determinado recinto ou espaço externo tendo em vista a remoção de poluentes do ar. O ar que respiramos é composto pela mistura de gases, vapores e partículas, no qual podem estar presentes centenas ou milhares de componentes químicos prejudiciais à saúde humana. Além de influenciar a saúde dos ocupantes do edifício, as características de temperatura, umidade e velocidade do ar também são determinantes para assegurar condições adequadas de conforto térmico. Assim, a ventilação natural também se configura como uma estratégia fundamental para o favorecimento do conforto higrotérmico tanto no interior das edificações como no meio urbano.

Renovar, de forma adequada, o ar dos ambientes que compõem uma habitação, por meio da ventilação natural, implica, por exemplo, reduzir o nível de exposição dos ocupantes a substâncias químicas e/ou orgânicas nocivas à saúde. Como destaca Spengler et al. (2001) a presença dessas substâncias no ar

pode estar ligada ao sítio onde o edifício foi construído, aos materiais utilizados em sua construção, às atividades desenvolvidas no interior dos ambientes, entre outros aspectos. Sob o ponto de vista do conforto térmico, a renovação adequada do ar por meio da ventilação natural pode representar uma das principais estratégias para o alcance de níveis adequados de conforto térmico (ALLARD, 2002; SANTAMOURIS e WOUTERS, 2006). Por ser uma estratégia arquitetônica passiva – ou seja, para o seu funcionamento não necessita de artifícios que consomem energia – a ventilação natural possui relação direta com a eficiência energética e a sustentabilidade do espaço construído.

Dessa forma, quando se pretende desenvolver um projeto no qual os ambientes serão ventilados naturalmente, os fatores relacionados à saúde humana e ao conforto térmico devem ser necessariamente considerados. Desses fatores decorrem impactos sociais, econômicos e ambientais diretamente relacionados com o projeto arquitetônico. Portanto, a ventilação natural não deve ser resumida como simplesmente o movimento do ar, ou uma abertura voltada para o exterior.

Sob esse prisma, a etapa inicial de desenvolvimento do projeto arquitetônico é, em grande parte, determinante para o favorecimento de níveis de qualidade e conforto adequados, uma



vez que decisões de projeto podem ser adotadas durante essa etapa sem a ocorrência de fortes impactos em termos de custos e execução da obra, como menciona Mascaró (2010). Dessa forma, é fundamental que sejam considerados fatores básicos relacionados à saúde humana e ao conforto térmico durante o desenvolvimento do projeto arquitetônico que utiliza a ventilação natural para favorecer a QIA e o CTP. Esse capítulo apresenta os principais fatores relacionados com a QIA e o CTP por meio da ventilação natural, identificados na literatura específica sobre o tema. A escolha dos fatores apresentados teve como principais critérios: a relação com a etapa inicial de projeto e a possibilidade de ação/tomada de decisão por parte do projetista.

1. CONCEITO DE QUALIDADE INTERNA DO AR RELACIONADO COM A VENTILAÇÃO NATURAL

Tendo em vista que a QIA por meio da ventilação natural ainda é uma área pouco difundida no campo da arquitetura, diferentemente do CTP, a presente tese identificou a

necessidade de se buscar uma fundamentação mais concreta para a aplicação deste conceito no desenvolvimento do trabalho. Assim, tendo como base a legislação brasileira, pôde-se identificar alguns conceitos para QIA estabelecidos em documentos, tais como: a Portaria n° 3523 do Ministério da Saúde (MS 3523, 1998); a Resolução – RE n° 09, de janeiro de 2003 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA); e a norma NBR 16.401-3 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, que versa sobre a “Qualidade do Ar Interior”. Esses documentos descrevem a QIA como:

“Art, 4° - [...]”

d) boa qualidade do ar interno: conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas do ar que não apresentam agravos à saúde humana.”

(MS 3523, 1998: pg.02)

“[...]”

g) Qualidade do Ar Ambiental Interior: Condição do ar ambiental de interior, resultante do processo de ocupação de um ambiente fechado com ou sem climatização artificial”

(RE n° 09, 2003: pg.03)



“3.1 - Ar interior de qualidade aceitável: ar que não contém poluentes em concentração prejudicial à saúde ou ao bem-estar e é percebido como satisfatório por grande maioria (80% ou mais dos ocupantes) do recinto.”

(NBR 16401-3, 1998: pg. 06)

No entanto, a MS 3523 faz clara menção que a sua aplicação se restringe a ambientes climatizados artificialmente, ou seja: que usam sistema de ar condicionado. A segunda definição, da RE nº 09 da ANVISA, apesar de englobar ambientes sem climatização artificial, somente especifica critérios para a “condição do ar” em ambientes climatizados artificialmente. Além disso, em contraposição à própria definição posta, o segundo tópico da resolução versa sobre sua abrangência e limita sua aplicação a “ambientes públicos ou coletivos climatizados artificialmente”. Por fim, a NBR 16.401-3 também restringe sua aplicação a ambientes climatizados artificialmente. Assim, os conceitos de QIA postulados na legislação brasileira não se aplicam a ambientes residenciais ventilados naturalmente.

Publicada em 2013 a NBR 15.575, que trata dos requisitos de desempenho de edificações habitacionais, é o documento oficial brasileiro mais recente publicado até o

momento que faz menção a QIA em edificações residências – sendo essa uma exigência posta como condição de habitabilidade, seja em edifícios ventilados naturalmente ou climatizados artificialmente.

“4.3 Habitabilidade

As exigências do usuário relativas à habitabilidade são expressas pelos seguintes fatores: [...] – saúde, higiene e qualidade do ar.”

(NBR 15575-1, 2013; pg. 11)

Identificando a necessidade de conceituar claramente a QIA em edificações ventiladas naturalmente, uma breve revisão de documentos oficiais no contexto internacional foi realizada. Dentre algumas conceituações, foi adotada para este trabalho a definição geral de QIA – que abrange a ventilação natural – posta pelo Conselho Internacional para a Pesquisa e Inovação no Edifício e na Construção (CIB) em conjunto com a Sociedade Internacional de Qualidade Interna do Ar e Clima (ISIAQ):

“[...] QIA pode ser definida como: as propriedades físicas, químicas e biológicas que o ar interno deve ter para, em ordem:
- não causar ou agravar doenças nos ocupantes do edifício;



- assegurar alto nível de conforto aos ocupantes do edifício no desempenho das atividades estabelecidas para as quais o edifício foi projetado e destinado.”

(CIB, 2004: pg. 07)

Ao longo do seu texto, o documento da CIB destaca a evidente complexidade envolvida neste conceito, tendo em vista, por exemplo, os diversos usos que um edifício pode ter e as variáveis envolvidas por parte dos usuários (ex.: diferentes densidades de ocupação, variação de idade, gênero, estado de saúde, pré-disposição genética ou biológica para adquirir doenças). Além das destacadas pelo documento da CIB, outras complexidades podem ser consideradas, como a variação do clima e microclima do sítio, diretamente relacionadas com as condições de conforto térmico no interior do edifício.

Dessa forma, a presente tese faz um recorte na abordagem desse conceito, possuindo como foco apenas os fatores que podem ser identificados e trabalhados pelos profissionais de projeto durante o desenvolvimento do Estudo Preliminar, visando favorecer a QIA e o CTP em habitações ventiladas naturalmente. A abordagem desses fatores específicos é apresentada a seguir.

1.1. Qualidade Interna do Ar e a Saúde Humana

Quando tratamos dos fatores que influenciam a QIA relacionados à saúde humana, estamos abordando, em última análise, um tema multidisciplinar que permeia tanto o setor da construção quanto o setor da saúde pública. Não por acaso, esse tema encontra vasta base teórica em trabalhos na área de medicina, em que um único poluente pode ser tópico de monografias e relatórios científicos (SPENGLER e SAMET, 1991; ROSENSTOCK e CULLEN, 1994; HARBER *et al.*, 1995; ROM, 1998; SPENGLER *et al.* 2001).

A exposição a determinados níveis de concentração de poluentes presentes no ar pode acarretar problemas que vão desde a percepção de odores indesejáveis até a ocorrência de determinados tipos de câncer. Tais problemas podem ser percebidos a curto e médio prazo, ou desenvolvidos ao longo do tempo (SEPPANEN, 2006; CIB, 2004; CEC, 1993). O relatório sobre QIA e seus impactos sobre a saúde humana, elaborado pelo grupo *European Collaborative Action* (ECA, 2003), aponta alguns malefícios relacionados com a baixa QIA em ambientes:



- A dispersão ou diluição insuficiente de vírus e bactérias transportados pelo ar pode causar doenças infecciosas;
- Altos níveis de umidade em ambientes, devido à escassez ou ausência de circulação do ar, favorecem o crescimento de micro-organismos como fungos e bactérias, os quais aumentam o surgimento de sintomas como alergias em pessoas propensas;
- O aumento do risco de desenvolvimento de câncer de pulmão está atrelado à exposição da fumaça do tabaco e ao radônio.

“O radônio é um gás nobre e radioativo gerado nos solos que estão enriquecidos por Urânio, Tório e Rádio. Esses elementos naturais podem ser encontrados em qualquer parte do mundo, portanto, qualquer prédio está sujeito a ter altos níveis de radônio. [...] O gás radônio é responsável por 55% da radiação que o ser humano recebe ao longo de sua vida.”

(LARANA, 2010, pg. 03)

Segundo o relatório do CIB (2004), dentre os agentes físicos que afetam a qualidade do ar, o radônio representa o principal fator de risco à saúde humana. Dependendo do seu nível de concentração no solo, a exposição ao radônio em

residências e outros tipos de edificações é responsável por 5% a 15% da ocorrência de câncer na população mundial.

Os demais elementos que afetam a QIA também representam sérios riscos à saúde, contabilizando números expressivos em escala global. O relatório da Organização Mundial de Saúde (WHO, 2011) aponta que os poluentes do ar no interior das edificações permanecem como um dos fatores principais de morte provocada por doenças respiratórias agudas. Isso representa um universo de aproximadamente dois milhões de mortes prematuras por ano, principalmente em países em desenvolvimento. Mais da metade dessas mortes é atribuída à pneumonia em crianças abaixo dos cinco anos de idade.

A baixa QIA também pode causar sintomas mais perceptíveis cotidianamente, como aqueles relacionados à Síndrome do Edifício Doente – SED. Tais sintomas interferem na produtividade e no desempenho de tarefas, seja em ambientes de trabalho ou em residências. Nos Estados Unidos, Fisk (2001) estimou o potencial anual de economia e ganho de produtividade apenas com o aumento da qualidade interna do ar nos edifícios. Tal quantia, à época, foi estimada em \$15 a \$40 bilhões com a redução dos sintomas da SED, e em \$20 a \$200 bilhões com o aumento da produtividade de funcionários.



“Em edifícios comerciais, o salário dos funcionários excedem os custos com energia e manutenção, aproximadamente em um fator de 100. [...] Assim, aumentar em 1% a produtividade pode ser suficiente para justificar investimentos equivalentes ao dobro dos custos com energia ou manutenção. [...] O aumento da produtividade em 1% para um funcionário, corresponde reduzir em 2 dias por ano as ausências por doença [...]”

(FISK, 2001: pg. 96-97)

Mesmo que os dados expostos por Fisk (2001) se refiram a edificações comerciais, o autor não descarta a influência da QIA sobre a produtividade humana nas habitações. Segundo dados do IBGE, em 2011, aproximadamente 23% dos brasileiros empregados trabalhavam em casa. Esse universo representava 4,1 milhões de pessoas, 2% a mais em relação ao ano de 2004. Dessa forma, problemas tipicamente ligados à QIA em edifícios comerciais também são passivos de ocorrer nas habitações, considerando sua utilização como ambiente de trabalho. Além disso, dos quatro tópicos citados por Fisk (2001) como sendo os mais influentes sobre saúde e produtividade em um ambiente, dois deles são males que também se relacionam diretamente com as habitações: doenças infecciosas (ex.: influenza, tuberculose, etc.), alergias e asma.

O autor ainda destaca que o estudo mais importante a respeito da influência da característica da edificação, sobre a ocorrência de doenças respiratórias, foi desenvolvido em ambientes tipicamente residenciais – estudo multianual realizado pelo Exército Norte-Americano. Esse estudo indicou que as taxas de doenças respiratórias, agudas com febre, são 50% maiores entre pessoas residindo em ambientes com janelas fechadas e com baixa taxa de renovação do ar interno pelo ar externo (natural).

Nessa mesma linha, outros estudos também podem ser destacados. Por exemplo, Langmuir *et al.* (1948) descreve o estudo desenvolvido pela Marinha Norte-Americana, no qual foi identificado que a taxa de doenças respiratórias é 23% menor em pessoas que convivem em ambientes habitacionais onde o ar interno foi exposto aos raios UV. Tal exposição também foi importante para o controle do mofo nos ambientes. A associação entre o surgimento de mofo em recintos do edifício e doenças respiratórias também é abordada por diversos autores (ex.: HUSMAN *et al.*, 1993; HUSMAN, 1996; PIRHONEN *et al.*, 1996). O estudo de Husman (1996) monitorou durante um ano residências com e sem a presença de mofo em seus ambientes. Em cento e cinquenta e oito residências, onde foi identificada a presença de



mofo nos ambientes, ocorreu o dobro de casos de doenças respiratórias agudas em relação as cento e trinta e nove residências sem problemas de mofo. Tais indicações reforçam o importante papel da ventilação natural em ambientes residenciais para o controle da umidade (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2008).

Entretanto, quantificar os riscos e custos inerentes à baixa QIA sobre a saúde humana é tão importante quanto saber como minimizá-los por meio da ventilação natural. Como mencionado anteriormente, a consideração dos fatores que influenciam a QIA desde as primeiras etapas do projeto pode ser determinante para se evitar ou minimizar os problemas descritos anteriormente. Dessa forma, a presente tese propõe a divisão desses fatores em Fatores Externos ao Projeto e Fatores Internos ao Projeto, visando a melhor organização e identificação dos mesmos. Ter clara esta organização em função da localização e do tipo de poluente, torna-se importante para se analisar a QIA no projeto. A Figura 1. 2 apresenta essa organização, tendo como base os dados levantados na revisão bibliográfica.

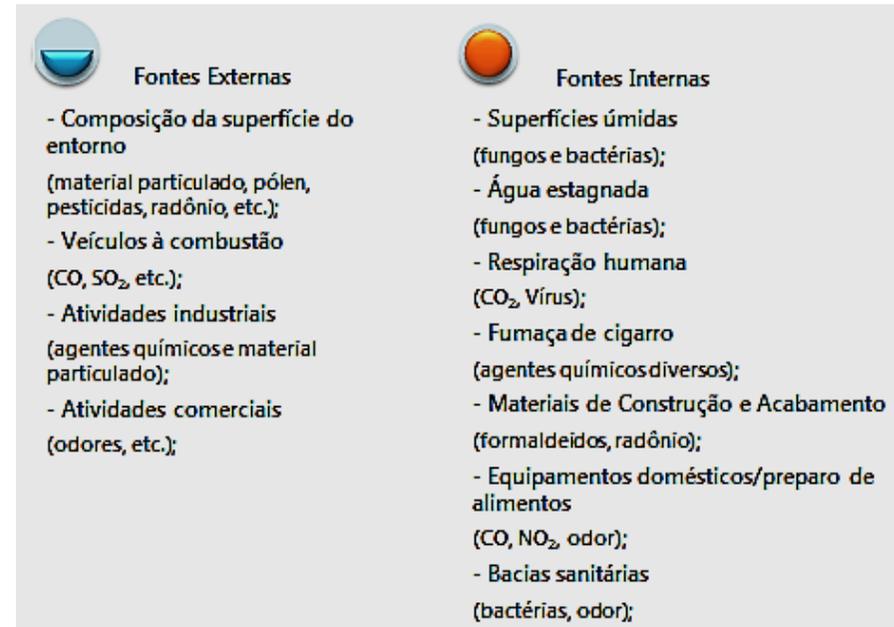


Figura 1. 2 – Organização dos elementos que interferem na QIA segundo a localização de sua fonte de emissão.

Importante destacar que, a partir dessa organização, também é possível identificar casos em que a ventilação natural não é uma solução efetiva para o controle do nível de concentração do poluente. Certas fontes e seus respectivos poluentes devem ser tratados com outras medidas preventivas. A presença de determinadas atividades industriais no entorno do



projeto ou áreas contaminadas por radônio requer estratégias mais amplas, tal como o adequado zoneamento de uso e ocupação do solo, ao invés de, simplesmente, aumentar a renovação do ar interno por meio da ventilação natural. Nesses casos, o desenvolvimento do projeto deve ser analisado em termos de viabilidade, tendo em vista os riscos envolvidos.

A organização apresentada na Figura 1. 2 também demonstra que deve ser dada atenção especial às fontes internas de geração de poluentes, em razão da sua diversidade e por apresentarem poluentes tão nocivos quanto às fontes externas. Tal constatação também é historicamente comprovada quando se investiga os problemas relacionados à QIA. Segundo Addington (2001) e Cooper (1998), as fontes internas de poluentes e as baixas taxas de renovação do ar estão ligadas diretamente, por exemplo, ao surto de influenza na Europa Renascentista no século XVII, casos de asfixia e intoxicação em espaços confinados no século XVIII, à persistência da tuberculose na Europa e América do Norte nos séculos XVIII e XIX, e aos sintomas relacionados à Síndrome do Edifício Doente desde o século XX até os dias atuais.

Em estudo desenvolvido na década de 80 pelas Agências de Proteção Ambiental Estaduais Norte-Americanas – U.S EPA's, foi comprovado que as fontes poluentes do ar no

interior das edificações são as principais responsáveis pela exposição individual de componentes tóxicos voláteis, em relação às fontes externas (SPENGLER *et al.*, 2001). Por exemplo, Melia (1977) e Samet (1991) abordam a necessidade de atenção aos efeitos nocivos à saúde decorrentes da presença de dióxido de nitrogênio gerado pela utilização de fogões a gás. Identificou-se que crianças que moram em residências com fogões a gás possuem maior propensão a problemas respiratórios em relação a crianças que moram em residências com fogões elétricos. Além disso, em uma habitação, os ambientes mais propensos à ocorrência de fungos e bactérias se caracterizam por apresentar níveis elevados de umidade (acima de 80%), sendo a temperatura do ar e o tipo de material que compõe a superfície fatores catalizadores (ECA, 2003). Dessa forma, banheiros, lavabos, cozinhas, copas, etc., são ambientes críticos para a proliferação de micro-organismos nocivos à saúde humana, principalmente em climas tropicais.

Esses estudos exemplificam o fato de que a QIA não depende apenas de fatores ambientais externos. Mesmo em grandes centros urbanos as fontes geradoras de poluentes no interior das edificações podem ser potencialmente mais nocivas à saúde humana. Por outro lado, para o controle desses poluentes,



ainda não se têm consolidadas taxas mínimas de renovação de ar aplicáveis a casos gerais. O estudo de Wargocki *et al.* (2002) apresenta uma vasta revisão da literatura publicada sobre a relação entre o aumento do fluxo de ar e a saúde humana em ambientes não industriais (escritórios, escolas, residências, etc.). A pesquisa aponta três constatações básicas:

- Taxa de ventilação igual ou menor que 25 l/s por pessoa pode afetar significativamente a saúde humana, principalmente em relação aos sintomas da Síndrome do Edifício Doente – SED.
- Existe um indicativo de que o aumento da taxa de ventilação de 10 l/s para 20 l/s por pessoa pode auxiliar na redução dos sintomas da SED.
- Ambientes com taxas de ventilação abaixo de 0,5 renovações de ar por hora (RAH) representam risco à saúde humana, tendo como referência habitações em países Nórdicos.

Os autores deixam claro a escassez de trabalhos que possibilitem um consenso em relação as taxas mínimas de renovação do ar seguras e amplamente aplicáveis. Mundialmente,

do universo de estudos publicados sobre o tema, apenas trinta foram julgados conclusivos e utilizados como base para a formulação de um consenso quanto aos efeitos sobre a saúde em ambientes não industriais. Desses, nove trabalhos foram realizados nos Estados Unidos, e vinte e um na Europa – sendo dezessete em países nórdicos (Dinamarca, Finlândia, Noruega e Suécia).

Assim, se por um lado existem valores de referência que estabelecem níveis máximos de concentração de diversos poluentes no ar, por outro lado, não existem valores mínimos gerais quanto à taxa de fluxo de ar necessária para assegurar níveis concentração desses poluentes. Por exemplo, o valor de 0,5 renovações de ar por hora – RAH, comprovado como limite de risco à saúde humana nos países Nórdicos, deve ser considerado de forma cuidadosa como referência para outras regiões. Como aborda Seppanen (2006), levando em consideração a influência da temperatura e umidade na formação de mofo e ácaro, o valor limite de risco à saúde humana em países com clima moderado ou tropical certamente é maior.

Todavia, a relação geral entre os níveis de concentração de poluentes e a taxa de renovação de ar necessária é conhecida e simples. Ou seja, quanto maior o nível



de concentração de poluentes em um ambiente maior será a taxa de renovação de ar necessária para sua retirada. Quando se trata de ventilação natural, as diretrizes adotadas no projeto são determinantes para aumentar a taxa de renovação do ar no ambiente. Quanto maior o número de fontes geradoras de poluentes identificadas durante o desenvolvimento do projeto, maiores deverão ser as medidas para aumentar o número de renovações de ar no interior dos ambientes. Para ambientes ventilados naturalmente, Allard (2002) apresenta graficamente a relação entre a concentração máxima de poluentes e a necessidade de aumento da taxa de renovação – dada em função do aumento do fluxo de ar (Figura 1. 3).

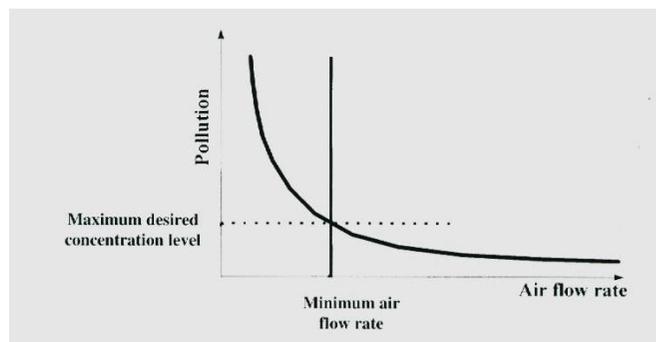


Figura 1. 3 - Relação entre a ventilação natural e a concentração de poluentes visando a QIA. Fonte: Allard (2002: pg.03).

É importante destacar que, no caso das edificações ventiladas naturalmente, o fluxo de ar necessário para o aumento da taxa de renovação não está vinculado ao consumo de energia. No caso da ventilação artificial, quanto mais elevado for o nível de concentração de poluente, maior será o fluxo de ar necessário e maior será a demanda energética requerida pelo sistema (Figura 1. 4). Um nível de consumo mínimo do sistema deverá ser constantemente mantido para que o nível de concentração de poluentes não se eleve.

Dessa forma, diretrizes de projeto, que maximizem a renovação do ar por meio da ventilação natural, favorecem a retirada ou diminuição dos poluentes do ar. Além disso, o potencial da ventilação natural, em termos de capacidade de renovação do volume de ar nos ambientes, ultrapassa significativamente os valores mínimos de renovação estimados para o insuflamento por meios mecânicos – sem, no entanto, elevar o consumo energético de edifício (ALLARD, 2002; ALLARD e GHIAUS, 2006; SANTAMOURIS, 2006).

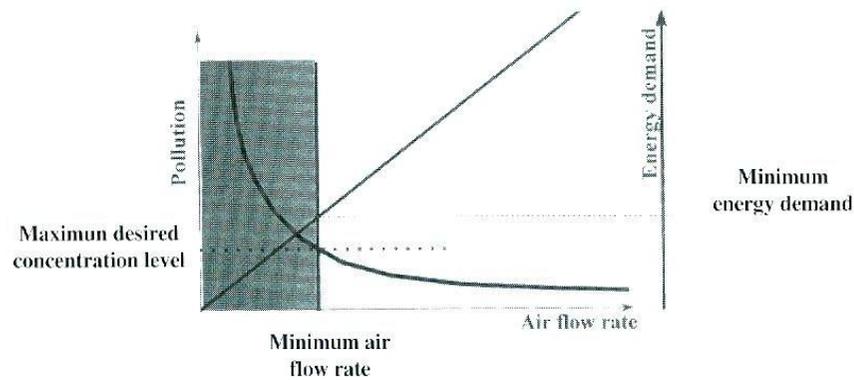


Figura 1. 4 - Relação entre a demanda de energia e a concentração de poluentes visando a QIA em edificações condicionadas artificialmente. Fonte: Allard (2002: pg.04).

1.1.1. Fatores Externos e Fatores Internos ao Projeto – QIA / Saúde Humana

A partir dos aspectos levantados sobre a QIA visando à saúde humana, é possível destacar alguns fatores a serem considerados durante o desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto. Os Fatores Externos ao Projeto estão relacionados às fontes externas de geração de poluentes e às características de

temperatura e umidade relativa do ar do clima local. Como abordado anteriormente, esses fatores estão relacionados diretamente com o potencial de aproveitamento da ventilação natural para favorecer níveis adequados de QIA ao edifício. Estão, portanto, sob o domínio indireto do projetista, uma vez que independem do projeto a ser desenvolvido. Assim, a existência de fontes externas de poluentes e as características do clima local são fatores que o projetista deve analisar, tendo como objetivo a adoção de ações e diretrizes de projeto que evitem ou minimizem efeitos negativos sobre a saúde dos usuários, ou aproveitem aspectos positivos que favorecem a QIA.

Os Fatores Internos de Projeto estão sob o domínio direto do projetista, pois seus efeitos sobre o favorecimento da QIA dependem das suas tomadas de decisão. Assim, a análise desses fatores auxilia na adoção de ações e diretrizes de projeto que os modifique no sentido de maximizar a QIA no edifício. Dessa forma, esses fatores estão relacionados com a eficiência da ventilação natural em favorecer níveis adequados de QIA, visando à saúde dos ocupantes. A Figura 1. 5 apresenta os Fatores Externos e Internos ao Projeto, que comporão parte dos diagramas de análise da ferramenta proposta.

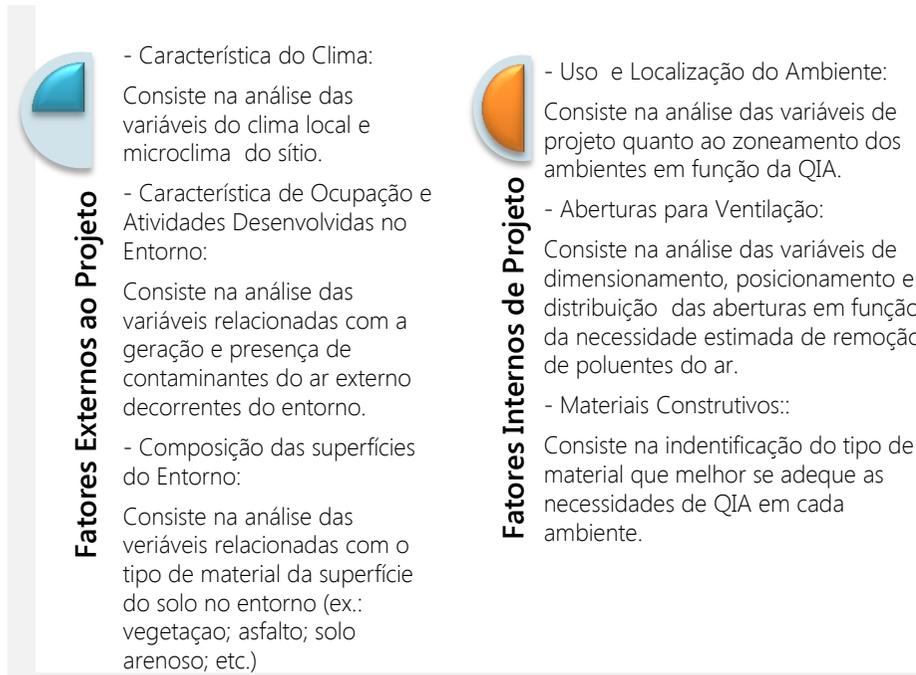


Figura 1. 5 - Fatores Externos ao Projeto e Fatores Internos ao Projeto que comporão os diagramas de análise da ferramenta proposta com relação à QIA – Saúde Humana.

1.2. Conforto Térmico Passivo

De início, é importante deixar claro o recorte da abordagem feita sobre o conforto térmico na arquitetura. O foco desta tese são os aspectos de conforto térmico relacionados à ventilação natural. Não sendo abordado, portanto, outros aspectos importantes que também contribuem para o conforto térmico no interior de edificações, como as propriedades físicas dos materiais e aspectos relacionados ao usuário (vestimenta, faixa etária, etc.).

Segundo Addington (2001), níveis de temperatura do ar visando ao conforto térmico, veem sendo recomendados em pesquisas, normas técnicas e/ou regulamentos desde o início do século XX - quando se inicia a possibilidade de controle da temperatura interna do ar no edifício por meio de sistemas mecânicos. No entanto, a relação entre o conforto térmico e a QIA começou a ser consolidada após a crise do petróleo em 1973. O aumento significativo do custo da energia mudou de forma drástica a atitude em relação ao controle ambiental nos edifícios. Nesse período, também surgem com maior força normas técnicas recomendando intervalos de temperatura e



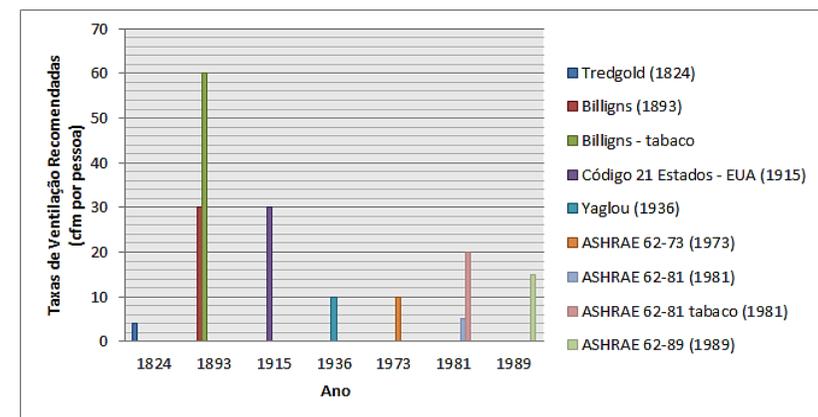
umidade para as edificações, como, por exemplo, a série de normas da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-condicionado - ASHRAE.

A partir de 1973 a ASHRAE propõe as primeiras alterações significativas em relação à taxa de renovação do ar recomendada para tipos diferentes de funções do edifício – aproximadamente 271 tipos de usos. Geralmente, as taxas de renovação do ar no ambiente estavam ligadas a um determinado intervalo de temperatura considerada propícia ao conforto da maioria dos usuários. Desse modo, as variações nas taxas de ventilação possuíam relação estreita com a variação na temperatura de conforto recomendada para as edificações. Nos Estados Unidos, por exemplo, as temperaturas de conforto térmico recomendadas já variaram em 15°C – de 14°C a 29°C – desde 1911 (KWOK, 2001; ADDINGTON, 2001).

As normas posteriores a 1973 reduziram a taxa base mínima de ventilação de 30 cfm por pessoa – referência desde 1893 – para 5 cfm por pessoa (ADDINGTON, 2001). Os efeitos negativos dessa redução acarretaram revisões posteriores. Alertas relacionados aos efeitos nocivos da fumaça do tabaco e estudos sobre conforto térmico desenvolvidos entre 1972 e 1989 acarretaram o aumento da taxa mínima de ventilação para 25 cfm

por pessoa em ambientes com fumantes, e para 15 cfm por pessoa em ambientes sem fumantes, como limite base para diversos ambientes (ADDINGTON, 2001; JANSSEN 1999). O Gráfico 1. 1 exemplifica as principais variações das taxas de ventilação recomendadas como padrão de referência nas edificações em termos de QIA.

Gráfico 1. 1 - Histórico das taxas de ventilação recomendadas.



Percebe-se a dificuldade para a determinação de taxas de ventilação fixas e, conseqüentemente, de temperaturas de conforto, mesmo em ambientes climatizados artificialmente.



Como afirma Santamouris (2006), devido às diversas interações entre a envoltória do edifício, o clima local, o entorno, os usuários e os sistemas que compõem o edifício, as condições fixas e padronizadas raramente ocorrem na prática. Em estudo desenvolvido por Madsen (1987), por exemplo, mesmo em ambientes com sistema de controle de temperatura interna, a flutuação diária pode ser da ordem de 0,5°C a 3,9°C. Essas variações são mais acentuadas em edifícios que utilizam sistemas passivos, como a ventilação natural. Assim, como aborda Santamouris (2006):

“Estudos de campo e pesquisas sobre conforto térmico têm mostrado que existe uma importante discrepância nos modelos de condições fixas (*steady-state models*), especialmente em zonas onde não há condicionamento mecânico. [...] pessoas que vivem em edificações ventiladas naturalmente são capazes de controlar seu ambiente e de se acostumar com a variação climática e diversidade térmica. Assim, suas preferências térmicas se estendem a um intervalo maior de temperatura e velocidade do ar.”

(SANTAMOURIS, 2006; pg. 221)

O tema abordado por Santamouris (2006) refere-se à teoria do Conforto Adaptativo (de DEAR *et al.* 1997; BRAGER e de DEAR, 2001; HUMPHREYS e NICOL, 2002). Basicamente, tal teoria expõe a fragilidade de modelos com intervalos fixos e restritos a uma curta variação de temperatura do ar em relação a ambientes ventilados naturalmente. Brager e de Dear (2001) analisaram dados de temperatura de conforto coletados em diversas regiões e continentes, os quais foram comparados com o perfil de temperatura de conforto previsto pelo método baseado no Voto Médio Predito - PMV e no modelo adaptativo (Figura 1. 6).

Os resultados encontrados pelos referidos autores deixam claro que as previsões realizadas com PMV são inadequadas para edificações ventiladas naturalmente, pois as temperaturas de conforto observadas nas edificações ventiladas naturalmente ficam fora do eixo das temperaturas previstas em laboratório por meio do modelo PMV. Para integrar os preceitos do conforto térmico adaptativo, Brager e de Dear (2001) propuseram modificações à norma ASHREA 55 – que define o intervalo das condições ambientais internas aceitáveis para a maioria dos ocupantes. As zonas de aceitação que compõem os intervalos de conforto no modelo adaptativo são formadas com base na temperatura interna de conforto e temperatura média do



ar externo. Essas zonas são obtidas por meio da média aritmética das temperaturas médias diárias, definindo a temperatura média externa. No intervalo de conforto proposto, a temperatura média do ar externo deve ficar acima de 10°C e abaixo de 33°C. A Figura 1. 7 apresenta o novo intervalo de conforto térmico adaptativo proposto para integrar a norma.

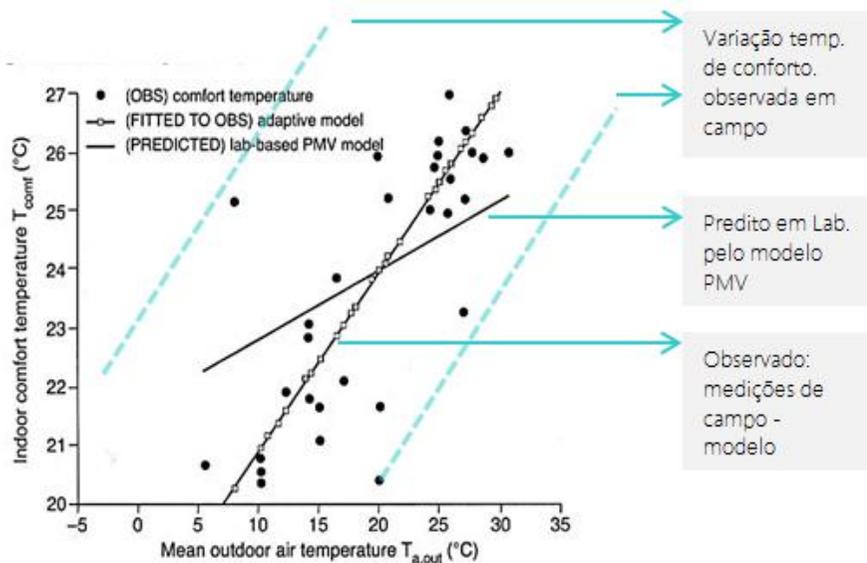


Figura 1. 6 - Temperaturas de conforto térmico observadas em campo (OBS), preditas em laboratório pelo modelo PMV. Fonte: adaptado de Santamouris (2006; pg. 222)

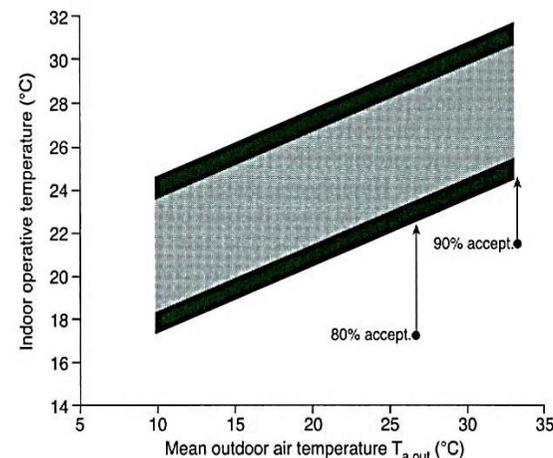


Figura 1. 7 - Novo intervalo de conforto a proposto como Norma de Conforto Adaptativo à compor ASHRAE 55 - aplicável para edifícios ventilados naturalmente. Fonte: Santamouris (2006: pg. 222)

Porém, a temperatura externa do ar do sítio não é a única variável a ser analisada no desenvolvimento do projeto com vistas à QIA – conforto térmico. Os níveis de umidade relativa e a velocidade do ar também são elementos fundamentais para o conforto térmico (OLGYAY, 1963; de DEAR *et al.*, 1997; GIVONI, 1994; HUMPHREYS e NICOL, 2002; SANTAMOURIS e WOUTERS, 2006). Em climas quentes, por exemplo, a velocidade do ar de 2 m/s pode proporcionar ambientes agradáveis, mesmo com



temperaturas externas chegando a 32°C (GIVONI, 1994). Com velocidades do ar mais baixas, próximas à 0,8m/s, é possível manter a temperatura interna 2°C abaixo em relação à temperatura externa em climas quentes com umidade relativa em torno de 60% (SANTAMOURIS, 2006).

Esse potencial de resfriamento para a obtenção do conforto térmico, proporcionado pela ventilação natural, também pode ser traduzido em potencial de redução do consumo energético nas edificações. Dependendo das condições climáticas locais, é estimada uma redução de aproximadamente 50% no consumo de energia em climas quentes (CARROL *et al.*, 1982 apud SANTAMOURIS, 2006). Em países europeus, estudos apontam que a ventilação natural pode representar um potencial de economia de energia em edifícios da ordem de 15% no Reino Unido, 53% na Itália, e 30% na Grécia (EMMERICH *et al.*, 2001; CARDINALE *et al.* 2003; SANTAMOURIS, 2006).

Os benefícios da incorporação da ventilação natural ao projeto arquitetônico são abordados em estudos clássicos sobre a interação homem - clima - arquitetura (Olgay, 1963; Koenigsberger *et al.*, 1977; Givoni 1976; Fathy, 1986). Trabalhos posteriores também se destacam por abordar o papel da ventilação natural para a obtenção da sustentabilidade, tanto ao

nível urbano quanto ao do edifício (ex.: SANTAMOURIS e ASIMAKOPOULOS, 1996; de DEAR *et al.*, 1997; ROMERO, 2000 e 2011; ALLARD, 2002; ALLARD e GHIAUS, 2006; HUMPHREYS *et al.*, 2002; SANTAMOURIS e WOUTERS, 2006; AYNSLEY, 2007). Nesses trabalhos, nota-se que as interações entre o clima, o espaço urbano e o edifício refletem as condições de conforto térmico no interior da edificação.

Em vista disso, o clima se destaca como primeiro grande fator a ser observado no desenvolvimento do Estudo Preliminar de projeto, visando favorecer o conforto térmico, por meio da ventilação natural. O microclima local característico do sítio onde o projeto será inserido apresenta-se como segundo grande fator. Por fim, a escala do edifício em que os aspectos como a orientação, forma da planta, posicionamento e tamanho de aberturas, entre outros, são decisivos para o correto aproveitamento da ventilação natural. Com base na revisão da literatura e recortes necessários para se atingir os objetivos da presente tese, foram definidos fatores externos e internos relacionados com a QIA visando ao conforto térmico.

No caso do conforto térmico passivo, os Fatores Externos ao Projeto condicionam as características de temperatura, umidade e velocidade do ar externo em relação ao



projeto, considerando: os fatores climáticos globais e locais; densidade de ocupação, rugosidade e relação W/H dos edifícios no entorno; a forma dos edifícios no entorno; e barreiras de vento no entorno. Referidos fatores são decisivos na identificação do potencial de utilização da ventilação natural no projeto. Já os Fatores Internos ao Projeto são aqueles que influenciam a eficiência da ventilação natural em proporcionar as condições de conforto térmico. Compreendem: posicionamento, orientação e forma do projeto; posicionamento, tamanho e distribuição das aberturas; divisões internas e profundidade da planta dos ambientes; elementos de captação e controle da ventilação natural (Figura 1. 8).



Figura 1. 8 - Fatores Externos ao Projeto e Fatores Internos ao Projeto que compõem os diagramas de análise da ferramenta proposta com relação à QIA – Conforto Térmico

Do mesmo modo que os Fatores Externos ao Projeto estão ligados ao potencial de aproveitamento da ventilação natural, os Fatores Internos ao Projeto estão ligados ao desempenho da ventilação natural para CTP. A consideração desses fatores na etapa inicial do projeto contribui decisivamente para favorecer níveis adequados de CTP ao edifício. Dada a



extensão de trabalhos no campo da arquitetura e urbanismo sobre tais fatores, será feita abordagem mais detalhadas nos tópicos seguintes.

1.2.1. Fatores Externos ao Projeto / Fatores Climáticos Globais e Locais

Romero (2000) apresenta importante organização e conceituação do clima e microclima, classificando seus elementos constituintes em: “Fatores Climáticos Globais” - aqueles que dão origem ao clima em seu aspecto macro ou mais geral; e “Fatores Climáticos Locais” - aqueles que dão origem ao microclima ou ao clima verificado em um ponto mais restrito (Quadro 1. 1). Em se tratando da estimativa do potencial de aproveitamento da ventilação natural, alguns desses fatores se destacam: velocidade, orientação e frequência de ocorrência dos ventos; vegetação; superfície do solo; umidade e temperatura do ar, e velocidade do vento no microclima. Importante ressaltar que os Fatores Climáticos Globais e Locais atuam de forma conjunta, sendo cada

um deles resultado da conjugação dos demais, conforme adverte a autora.

Quadro 1. 1- Fatores Climáticos que influenciam a QIA em relação ao conforto térmico natural, no projeto. Fonte: adaptado de Romero (2007).

Fatores Climáticos Globais	Fatores Climáticos Locais
Radiação Solar	Topografia - <i>orientação, exposição e elevação.</i>
Latitude	Vegetação
Altitude	Superfície do solo - <i>natural ou construído, rugosidade.</i>
Ventos - <i>velocidade e orientação predominantes, frequência de ocorrência.</i>	Umidade e temperatura do ar - médias, máximas e mínimas anuais.
Massas de água e terra	Movimento do ar - velocidade, ângulo de incidência.

A interação entre os fatores climáticos globais e locais, e sua significativa influência sobre o comportamento e características do vento no espaço urbano, foi objeto de um dos principais estudos já realizados sobre ventilação natural em áreas urbanas. O projeto europeu *Natural Ventilation in Urban Areas* (URBVENT) (ALLARD, 2002; ALLARD e GHIAUS, 2006) realizou



estudos da influência do ambiente urbano sobre as características da ventilação e o respectivo impacto sobre o consumo de energia em edifícios. Por exemplo, a redução da velocidade dos ventos e formação de Ilhas de Calor Urbanas foram identificados como fatores influentes no aumento do consumo energético do edifício. Da mesma forma, o projeto *Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces* (RUROS) - também de iniciativa europeia – estudou a influência do microclima sobre o conforto térmico no espaço urbano, tendo como fatores principais a temperatura do ar e a radiação solar (CRES, 2004; NIKOLOPOULOU e LYKOUDIS, 2006).

Em escala mais específica, estudos nacionais também alertam para a formação das Ilhas de Calor no espaço urbano e sua influência no aumento da temperatura (ROMERO 2007 e 2011; BAPTISTA, 2003). O Quadro 1. 1 e o Quadro 1. 2 exemplificam as alterações de alguns elementos do clima regional, em relação ao microclima nas áreas mais urbanizadas, tendo como base trabalhos de Landsberg (1970 *apud* ROMERO, 2007), Allard e Alvarez (2002).

Quadro 1. 2- Alterações observadas entre o microclima urbano e rural. Fonte: adaptado de Landsberg (1970 *apud* ROMERO, 2007) e Allard e Alvarez (2002).

Elemento climático	Entorno urbano em relação ao rural
Temperatura do ar (média anual)	0,5 a 1,0°C maior
Velocidade do vento (média anual)	20 a 30% menor
Frequência de ventos fracos	5% a 20% maior
Intensidade de turbulência dos ventos	50% 100% maior
Umidade relativa (verão)	8% menor
Temp. superfície do solo	20% maior

Conforme aborda Romero (2000 e 2011) e Romero e Souza (2007), as características da ventilação no espaço urbano apresentam destacada possibilidade de alteração durante o processo de ocupação do solo. Além disso, a proximidade com massas de água e vegetação, e a topografia do sítio, são variáveis importantes para a conformação do microclima do sítio de interesse, as quais estão diretamente relacionadas à ventilação natural no espaço urbano. Assim, conhecer as características do ar e as variáveis que interferem em seu comportamento possibilita ao projetista trabalhar com diretrizes durante o desenvolvimento do projeto, visando ao melhor aproveitamento da ventilação natural.

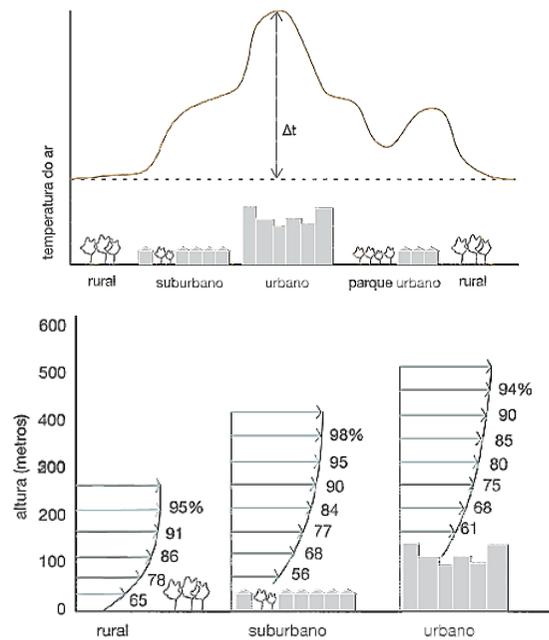


Figura 1. 9 - À esquerda, diferença entre a temperatura do ar em diferentes microclimas. À direita, diferença no percentual de velocidade do vento em diferentes microclimas. Fonte: Mascaró (1996) - adaptado de Campanhoni (2012).

Os estudos de Romero (2000 e 2007) e Romero e Souza (2007) já identificam os principais fatores de projeto referentes ao clima e microclima – servindo de base para este trabalho. Assim, para o desenvolvimento dos diagramas de

análise referentes a este tópico, foram selecionados os seguintes Fatores Externos ao Projeto:

- Temperatura e umidade relativa do ar;
- Velocidade e orientações predominantes do vento;
- Características do relevo e topografia do sítio;

Elementos como a vegetação, rugosidade do solo, entre outros – apontados por Romero (2000) - foram destacados desse tópico para serem abordados de forma mais específica e organizada nos tópicos seguintes.

1.2.2. Fatores Externos ao Projeto | Densidade de Ocupação e Relação W/H

A influência da densidade de ocupação, relação W/H, forma dos edifícios, e rugosidade do terreno no comportamento do fluxo de ar no espaço urbano, é abordada de forma mais



específica em estudos sobre cânions urbanos (ex.: OKE, 2006; GEORGIAKIS e SANTAMOURIS, 2005; SILVA, 2013). A densidade de ocupação consiste na proporção de área ocupada pelos volumes construídos em relação às áreas livres no trecho urbano a ser analisado (Figura 1. 10). No caso da ventilação natural, a dimensão do trecho urbano a ser analisado está, geralmente, relacionada com o tamanho da quadra, ou considera a distância do objeto em análise até o volume de maior influência no comportamento da ventilação (AYNSLEY *et al.* 1977; ALLARD; 2002; GHIAUS e ALLARD, 2005). A densidade edificada é calculada conforme a Equação 1. 1, apresentada por Georgiakis e Santamouris (2005).

Equação 1. 1

$$D = A_T/A_L$$

Onde:

D = densidade de ocupação;

A_T = é a média das áreas de telhado de cada edifício no trecho analisado (medida em plano);

A_L = é a média das áreas dos lotes de cada edifício.

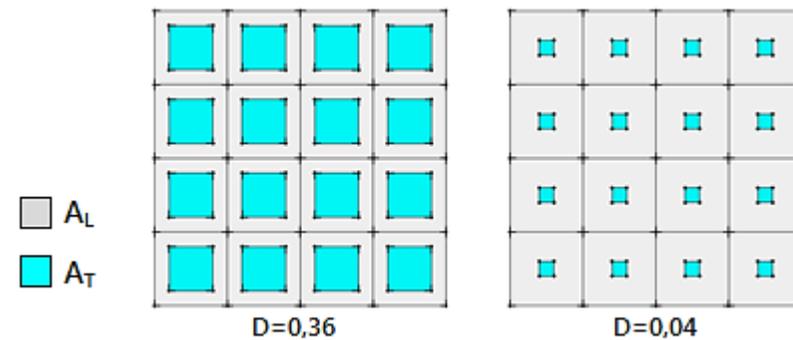


Figura 1. 10 - Exemplo de densidades de ocupação diferentes para um mesmo trecho urbano.

Assim, quanto maior for a densidade de ocupação no trecho urbano onde o projeto será desenvolvido, maior será a interferência dos volumes construídos no fluxo do vento. Contudo, a interferência da densidade de ocupação no fluxo do vento deve ser analisada em conjunto com a relação W/H – onde W é a dimensão do afastamento e H é a altura do volume. Considera-se, portanto, a ocupação do trecho urbano e as alturas dos volumes construídos, duas variáveis fundamentais para a formação de esteiras de vento no espaço urbano (zonas onde a velocidade do vento é reduzida). Como abordam, por exemplo, os trabalhos de Georgiakis e Santamouris (2005) e Romero (2007),



essa relação é importante para se identificar os afastamentos necessários entre os volumes construídos, com vistas à recuperação da velocidade e direção normal do fluxo do vento, tendo em vista que a formação de esteiras de vento reduz o potencial de aproveitamento da ventilação natural no edifício.

A redução da velocidade do vento devido aos afastamentos foi abordada em estudos como os de Lee *et al.* (1980 *apud* BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2008), Ghiaus e Allard (2005), Santamouris (2006), entre outros. De forma distinta, mas com princípios semelhantes, os autores classificam três cenários para o regime do fluxo do ar em relação à formação das esteiras de vento – volume isolado, volume com interferência da esteira de vento e volume na zona de sombra de vento (Figura 1. 11). Assim, Lee *et al.* (1980 *apud* BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2008) indica que, para a recuperação da velocidade do vento ao nível do edifício, o afastamento entre volume construído (E_c) deve ser maior que a soma das regiões de sombra (E_s e E_b). No entanto, o autor não especifica a forma de cálculo desses afastamentos, levando-se em consideração que a área de esteira de vento também está relacionada com sua velocidade de incidência sobre os volumes.

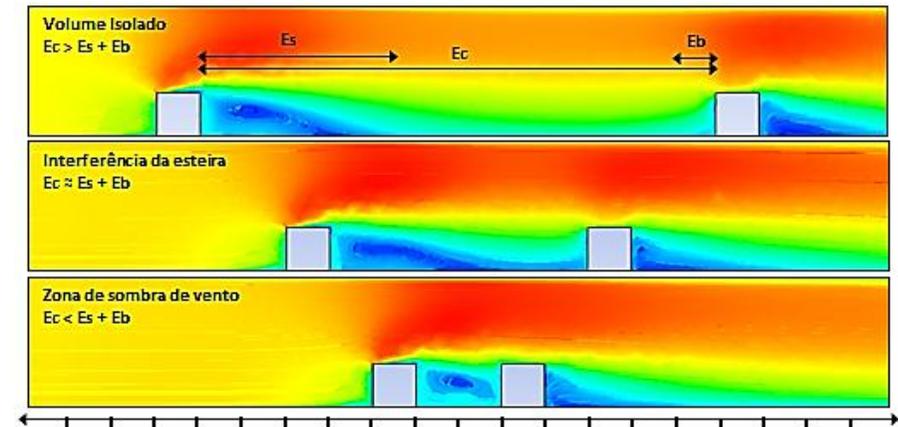


Figura 1. 11 - Relação entre os afastamentos e a recuperação da velocidade do vento. Fonte: adaptado de Lee *et al.* (1980 *apud* BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2008)

No caso do Distrito Federal, por exemplo, estudos de Romero (2007) e Silva (2013) recomendam afastamentos em que a relação W/H fique entre 1 e 3. Tais afastamentos são indicados como ideais em termos ambientais, considerando não somente a ventilação urbana como também a temperatura do ar e o fator de visão do céu. Afastamentos com essa relação W/H são caracterizados por Romero (2007) como “espaços de recolhimento”. Já as relações menores que 1 são caracterizadas



como “claustrofóbicas”, e maiores que 3 como “espaços expansivos” (Figura 1. 12).

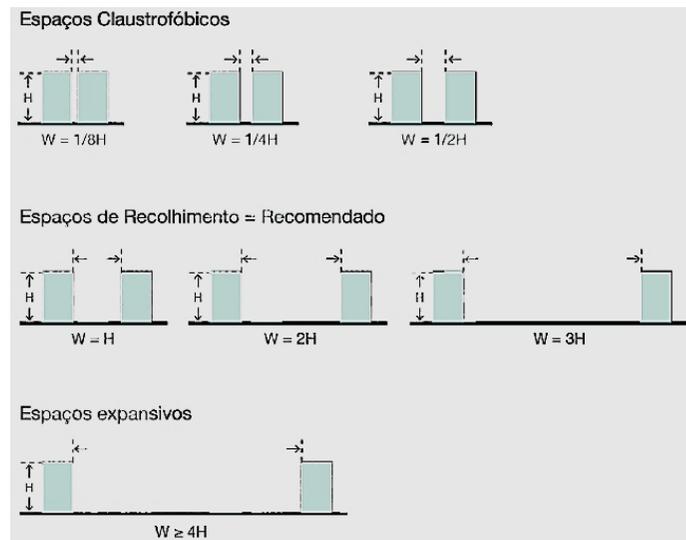


Figura 1. 12 - Caracterização dos espaços segundo a relação W/H. Fonte: Romero (2007)

Autores como Oke (2006), Georgiakakis e Santamouris (2005), Romero (2007), e Silva (2013), também alertam para a influência da relação W/H sobre o aumento da temperatura do ar no espaço urbano. Por exemplo, trechos adensados, com baixa

relação W/H (menor que 1), apresentam em média 2°C a mais na temperatura do ar em relação a outras áreas. Assim, a relação W/H pode impactar tanto a velocidade do ar quanto sua temperatura, interferindo significativamente no seu potencial de aproveitamento para fins de conforto térmico.

A forma dos volumes construídos no entorno do projeto também surge como um importante fator para ser analisado, uma vez que influenciam a dinâmica da ventilação nos espaços urbanos. Quanto a sua influência sobre o fluxo do vento, Evans (1979 *apud* BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2008) realizou uma série de experimentos em túnel de vento com volumes cúbicos modulados (Figura 1. 13). Os resultados demonstram que o tamanho da esteira de vento depende tanto da largura quanto da altura e profundidade dos volumes. Assim, considerando a incidência perpendicular à fachada, quanto maior for sua largura e altura, maior será a esteira formada à sotavento. Por outro lado, quanto maior for sua profundidade (considerando uma cobertura plana), menor será a esteira de vento formada (Figura 1. 13).

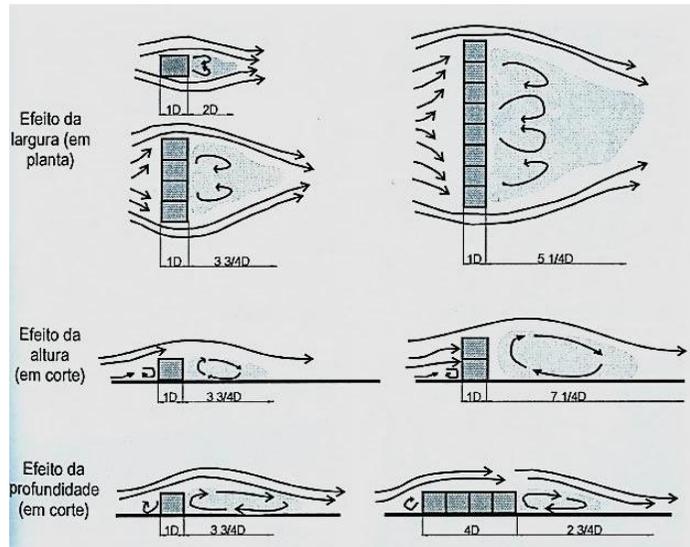


Figura 1. 13 - Influência das dimensões do edifício no tamanho da esteira.
Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 57).

A influência da forma do volume sobre a esteira de vento também está ligada à elevação do volume construído em relação ao solo com a utilização de pilotis. O estudo clássico de Aynsley *et al.* (1977), entre outras contribuições, identificou a influência positiva da elevação do volume construído do solo, tendo como parâmetro a distribuição mais uniforme do coeficiente de pressão do vento sobre as superfícies verticais do

volume. Bittencourt e Cândido (2008) também mencionam que o uso de pilotis, com altura mínima de um metro (1m) em relação ao solo, pode melhorar em aproximadamente 20% a eficiência da ventilação interna de uma edificação.

Oke (2006) apresenta uma classificação simplificada da rugosidade do terreno em relação a sua capacidade de influenciar a velocidade dos ventos no espaço urbano (Figura 1. 14). O autor aborda a rugosidade como um dos três fatores determinantes para tal influência, além da relação W/H (*Aspect ratio*), e impermeabilização do solo. Assim, a consideração da rugosidade no trecho urbano, onde o projeto será inserido, torna-se um fator interessante para a análise do potencial da ventilação natural. Por meio da classificação apresentada por Oke (2006), pode-se desenvolver diagramas que representem as diferentes rugosidades do terreno de acordo com o espaço construído.



Urban Climate Zone, UCZ ¹	Image	Roughness class ²	Aspect ratio ³	% Built (impermeable) ⁴
1. Intensely developed urban with detached close-set high-rise buildings with cladding, e.g. downtown towers		8	> 2	> 90
2. Intensely developed high density urban with 2 – 5 storey, attached or very close-set buildings often of brick or stone, e.g. old city core		7	1.0 – 2.5	> 85
3. Highly developed, medium density urban with row or detached but close-set houses, stores & apartments e.g. urban housing		7	0.5 – 1.5	70 - 85
4. Highly developed, low or medium density urban with large low buildings & paved parking, e.g. shopping mall, warehouses		5	0.05 – 0.2	70 - 95
5. Medium development, low density suburban with 1 or 2 storey houses, e.g. suburban housing		6	0.2 – 0.6, up to >1 with trees	35 - 65
6. Mixed use with large buildings in open landscape, e.g. institutions such as hospital, university, airport		5	0.1 – 0.5, depends on trees	< 40
7. Semi-rural development, scattered houses in natural or agricultural area, e.g. farms, estates		4	> 0.05, depends on trees	< 10

Key to image symbols: buildings; vegetation; impervious ground; pervious ground

Figura 1. 14 - Classificação simplificada de diferentes formas urbanas e seus impactos sobre a temperatura, umidade e ventos. Fonte: Oke (2006: pg. 11).

Para compor os diagramas de análise referentes a este tópico, foram escolhidos os seguintes Fatores Externos ao Projeto:

- Densidade Edificada média no trecho urbano onde o projeto será desenvolvido;
- Relação W/H média no trecho urbano onde o projeto será desenvolvido;
- Rugosidade média no trecho urbano onde o projeto será desenvolvido;
- Forma característica dos volumes que compõem o trecho urbano onde o projeto será desenvolvido.

1.2.3. Fatores Externos ao Projeto | Barreiras de Vento

Além dos volumes construídos no entorno do projeto, alguns elementos podem se configurar como barreiras de obstrução para a ventilação natural e devem ser identificados previamente no desenvolvimento do Estudo Preliminar. Muros,



densas massas vegetais e o relevo natural do sítio são exemplos dessas barreiras.

Com relação aos muros, Boutet (1987) desenvolveu um estudo em que aborda o percentual de redução da velocidade do vento para diferentes porosidades de superfícies verticais – muros e cercas (Figura 1. 15). Nota-se nos resultados, por exemplo, que cercas vazadas, compostas por aletas inclinadas a 60° para cima, formam uma área de sombra de vento (com apenas 10% da velocidade inicial) mais extensa em relação aos muros sólidos. No que diz respeito à porosidade, cercas com 50% de área vazada apresentaram melhores resultados em termos de favorecimento do escoamento de fluxo de ar, quando comparadas com cercas com menor porosidade. Tal fato evidencia, por exemplo, que tanto a altura quanto a forma das vedações verticais do lote onde projeto será inserido são aspectos importantes a serem considerados quando se deseja o aproveitamento da ventilação natural – principalmente em edificações térreas.

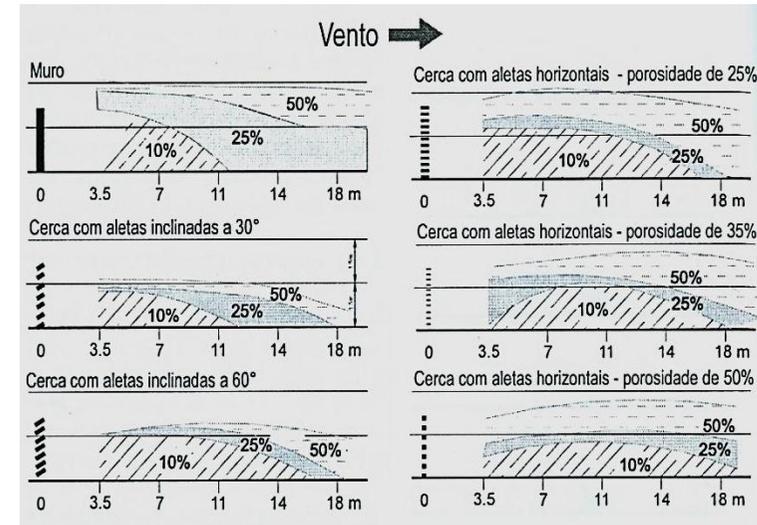


Figura 1. 15 - Estudo do percentual de redução da velocidade do vento em função do tipo e porosidade da superfície vertical. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 62) adaptado de Boutet (1987).

Olgay (1963) e Priolo (2002) abordam a redução da velocidade do vento em função de massas vegetais densas. Olgay (1963) menciona estudos realizados na Estação Experimental Agrícola em Kansas, nos Estados Unidos, apontando um percentual de redução em torno de 25% a 75% nas correntes de ar, dependendo da distância do objeto em relação à massa de vegetação muito densas – bosques e florestas. Para massas de



vegetação menores, árvores isoladas ou em pequenos conjuntos, o autor apresenta sua influência enquanto barreira vertical sobre o comportamento do fluxo de ar (Figura 1. 16). É importante notar que massas de vegetação de menor porte podem ocasionar a alteração no fluxo do vento, formando esteiras de vento diferentes, dependendo de sua distância em relação ao edifício e do tipo de vegetação.

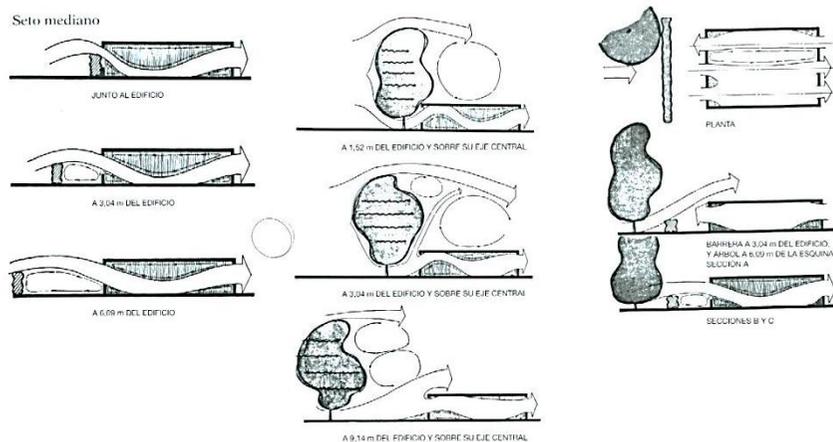


Figura 1. 16 - Massas vegetais como elementos de obstrução e influenciadores do fluxo de ar. Fonte: Olgay (1963: pg. 102)

Tanto Olgay (1963) como Priolo (2002) abordam a possível redução ou mudança no fluxo do vento devido à presença de massas de vegetação densas. Apontam, também, a possibilidade de utilizar a vegetação para aumento da velocidade e direcionamento do fluxo de ar para áreas de interesse do projeto. Havendo a possibilidade de se trabalhar com a disposição das árvores, pode-se aumentar em cerca de 25% a velocidade do vento por meio do efeito Venturi (PRIOLO, 2002), como mostra a Figura 1. 18. A Figura 1. 18, apresentada por Olgay (1963), ilustra a possibilidade de modificação do fluxo do ar – seja para sua captação ou obstrução – por meio da vegetação utilizada no paisagismo.

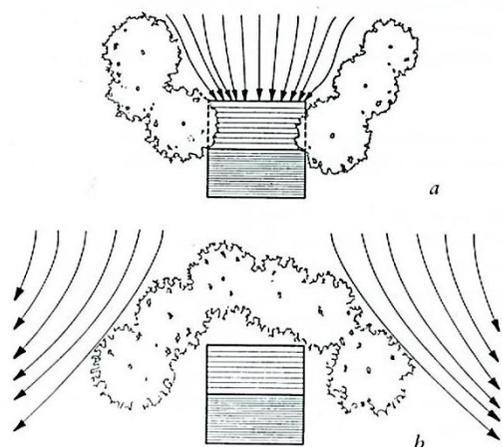


Figura 1. 17 – Possibilidade de otimização (a) ou obstrução (b) do fluxo de ar por meio da disposição da vegetação em relação ao edifício. Fonte: Priolo (2002: pg. 201)

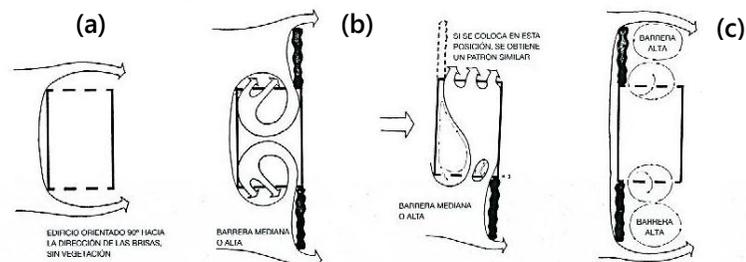


Figura 1. 18 – Fluxo de ar sobre o edifício (a); possibilidade de captação do fluxo do ar através da disposição da vegetação (b); obstrução do fluxo indesejado (c). Fonte: Olgyay (1963: pg. 102).

Destaca-se, ainda, a necessidade de se considerar os efeitos benéficos da vegetação em relação aos aspectos de temperatura e umidade do ar, e em termos de filtragem e redução da concentração de materiais particulados. Romero (2007) destaca a capacidade da vegetação de filtrar os contaminantes do ar (poeira, CO₂, etc.), bem como de reduzir sua temperatura e de aumentar sua umidade relativa, criando um microclima diferenciado em relação às áreas sem vegetação. Com base na revisão dos trabalhos publicados sobre o tema, Bowler *et al.* (2010) identificou que a temperatura do ar em áreas verdes e parques urbanos é aproximadamente 1°C menor em comparação às demais áreas. Da mesma forma, Akbari e Taha (1992) abordam a influência positiva da presença da vegetação sobre o edifício, o que pode reduzir de 15% a 35% o consumo energético de sistemas de ar condicionado durante períodos mais quentes – efeito relacionado diretamente com a redução da formação de Ilhas de Calor Urbanas. No contexto brasileiro, Batista (2003) identificou reduções em torno de 10°C na temperatura do ar em áreas que passaram por reflorestamento.

Portanto, a análise da presença e do tipo de cobertura vegetal, que compõem as superfícies do entorno onde o projeto será desenvolvido, torna-se importante indicador da qualidade do



ar. Assim, pode-se destacar como variáveis para o desenvolvimento dos diagramas de análise da ferramenta proposta:

- Barreiras de vento no entorno do sítio onde o projeto será desenvolvido;
- Diretrizes para as vedações verticais dos limites do lote (cercas e muros);
- Diretrizes quanto à utilização da vegetação/paisagismo

Pode-se identificar, nas variáveis escolhidas referentes a esse tópico, a transição dos Fatores Externos ao Projeto (barreiras de vento no entorno) para os Fatores Internos ao Projeto (vedações verticais dos limites do lote e diretrizes de paisagismo do projeto), os quais serão abordados a seguir.

1.2.4. Fatores Internos de Projeto | Posicionamento, Orientação e Forma do Projeto

Como visto, a formação das esteiras de vento no espaço urbano interfere no potencial de aproveitamento da ventilação nas edificações posicionadas sob a influência desse fenômeno. Durante o desenvolvimento do projeto, pode-se adotar diretrizes quanto ao seu posicionamento, orientação e forma, que visem à eficiência da captação do vento e à redução da interferência de seu fluxo no espaço urbano.

Com relação ao posicionamento do projeto, Priolo (2002) exemplifica a escolha correta de sua locação para melhor captação da ventilação natural no sítio urbano, a partir da análise da configuração dos volumes construídos em seu entorno (Figura 1. 19). Diretrizes de posicionamento do projeto possibilitam, ainda, trabalhar com a captação ou obstrução do fluxo de ar, dependendo das necessidades de conforto térmico.

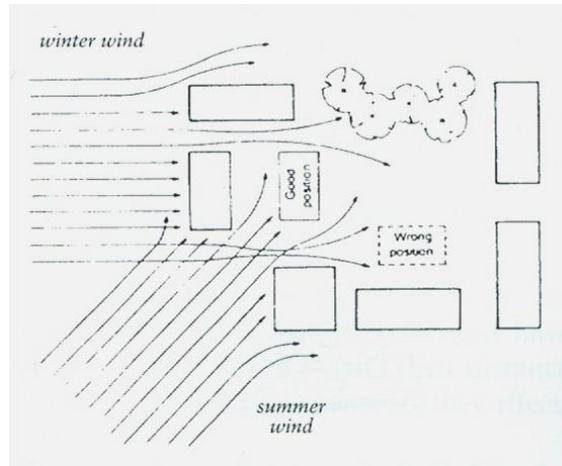


Figura 1. 19 – Exemplos da locação menos adequada e mais adequada no sítio urbano em relação a ventilação. Fonte: Priolo (2002: pg. 197)

No que diz respeito à orientação das fachadas do projeto, o estudo de Aynsley *et al.* (1977) identificou uma redução de aproximadamente 66% no coeficiente de velocidade média do vento (C_v) no interior de edificações, com a alteração do ângulo de incidência do vento de 0° para 75° em relação à superfície com as aberturas (Figura 1. 20). Nesse mesmo estudo, os autores também identificaram um aumento aproximado de 18% no C_v para ângulos de incidência de 15° . Dessa forma, a partir da identificação das orientações predominantes do vento, deve-se

buscar a melhor orientação das fachadas em relação ao seu ângulo de incidência, sendo esse um fator importante para a eficiência da ventilação natural no projeto.

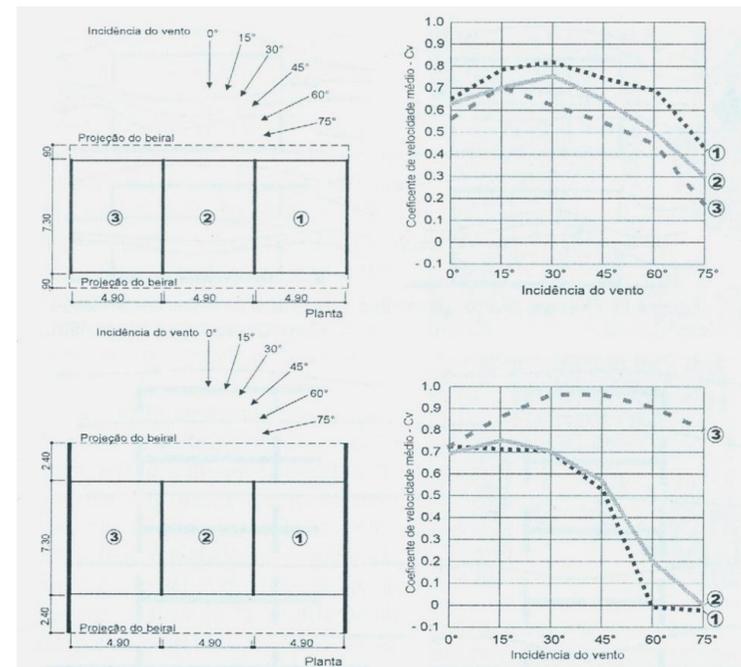


Figura 1. 20 – Influência do ângulo de incidência do vento sobre o coeficiente de velocidade do ar interno. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 80) adaptado de Aynsley *et al.* (1977).



Como menciona Priolo (2002), a forma da planta baixa e do volume construído influenciam a velocidade do vento e os campos de pressão gerados ao seu entorno, principalmente devido aos seguintes aspectos: altura do edifício, forma da cobertura, proporções (largura e profundidade), e rugosidade das fachadas. Condensados por Priolo (2002), como mostra o Quadro 1. 3, esses aspectos e suas implicações são temas recorrentes em diversos estudos sobre a forma do projeto.

Autores como Evans (1979 *apud* Bittencourt e Cândido, 2008) e Boutet (1987) realizaram estudos em túneis de vento, onde volumes em forma de "L" "H" e "C" foram analisados quanto a sua interferência no fluxo de ar (Figura 1. 21). Identificou-se que as formas em L e C possuem melhor desempenho tanto em relação ao aproveitamento da ventilação no edifício, quanto em relação à esteira de vento formada pelos volumes. Os autores ainda destacaram que edifícios com plantas em forma H não são recomendados, particularmente, em climas quentes.

Quadro 1. 3- Aspectos relacionados com a forma do projeto/edifício e suas implicações.

Aspectos da Forma	Implicações
Altura do edifício	Quanto maior a altura, maior o aumento da velocidade do vento incidente; maior o aumento do fluxo interno de ar; maiores são as alterações nos campos de pressão atuantes na fachada; e maior o aumento do efeito chaminé devido aumento da diferença de temperatura.
Forma da cobertura	Influência sobre a distribuição da pressão do vento na cobertura e nas partes mais elevadas da fachada
Proporções	Influência sobre os campos de pressão atuantes na renovação interna do ar (ex.: desempenho da ventilação cruzada).
Rugosidade da fachada	Influência sobre a captação do vento e exposição à radiação solar.

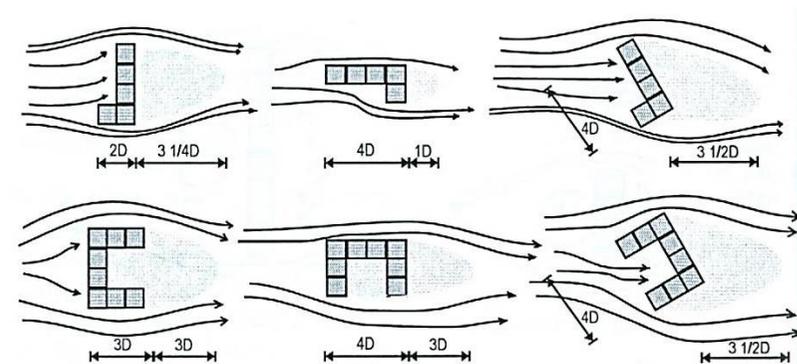


Figura 1. 21 – Influência da forma da planta do projeto no comportamento do fluxo do vento. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg.58) adaptado de Evans (1979) e Boutet (1987).



Desse modo, destacam-se as seguintes variáveis para o desenvolvimento dos diagramas de análise da ferramenta proposta:

- Orientação das fachadas e locação do projeto em relação aos ventos predominantes e o entorno construído;
- Ângulo de incidência do vento em relação às aberturas;
- Forma da planta baixa em relação a sua influência na formação de esteiras de vento.

1.2.5. Fatores Internos de Projeto / Localização e Tamanho das Aberturas

Com relação à localização das aberturas, diversos estudos abordam aspectos básicos para seu melhor desempenho, tanto para o resfriamento passivo dos usuários, quanto para o resfriamento da estrutura do edifício (ex. OLGYAY, 1963; GIVONI, 1976; PRIOLO, 2002; FAVAROLO e MANZ, 2005; ALLARD e

GHIAUS, 2006; SANTAMOURIS e WOUTERS 2007). Com base nesses autores, alguns aspectos principais podem ser destacados:

- No projeto, deve-se dar prioridade a ambientes com, pelo menos, duas aberturas em superfícies distintas – perpendiculares ou paralelas;
- Quando o objetivo for a ventilação cruzada, pelo menos uma das aberturas deve estar localizada à altura dos ocupantes do recinto;
- Quando o interesse for o resfriamento da estrutura do edifício, a abertura deve estar localizada próximo às superfícies onde ocorrem as maiores trocas térmicas (ex.: teto e paredes);
- Para a ventilação cruzada, a abertura de entrada do ar deve ser verticalmente localizada em uma altura menor em relação à abertura destinada a retirada do ar;
- Para ambientes onde for possível apenas uma abertura, esta deve ser localizada mais próxima do forro, observado seu dimensionamento e possibilidade de utilização do efeito chaminé. Nesses casos, também é preferível aberturas desde o piso ao teto com utilização de varandas;



Estudos realizados por Olgyay (1963), Givoni (1976) e Drach (2007), por exemplo, avaliam as alterações na direção e distribuição do fluxo do vento em ambientes internos, a partir da alteração do tamanho e posicionamento de aberturas. Nos estudos de Olgyay (1963) e Givoni (1976) são analisados os efeitos da localização das aberturas em paredes opostas sobre o direcionamento do fluxo do ar interno (Figura 1. 22). Dependendo da localização das aberturas, tanto vertical quanto horizontal, pode-se direcionar o fluxo interno do ar no ambiente conforme as necessidades identificadas. Por exemplo, no caso de dormitórios e salas, o fluxo do vento pode ser direcionado para o nível do usuário nas áreas determinadas para camas e sofás.

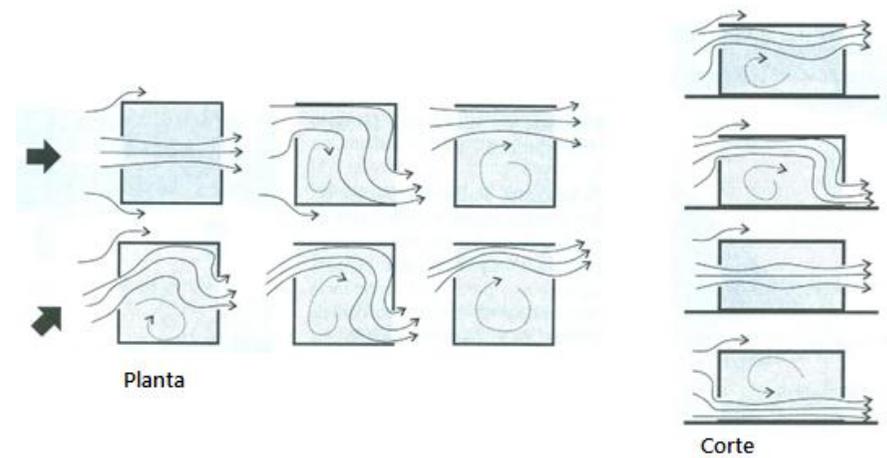


Figura 1. 22 – Efeito da localização das aberturas em paredes opostas (em planta e em corte). Fonte: adaptado de Givoni (1976).

Além do direcionamento, ocorre também o aumento da velocidade e quantidade do fluxo de ar interno por meio da ventilação bilateral. O estudo de Drach (2007) teve por objetivo a análise do escoamento do fluxo de ar interno em projetos de habitação popular por simulação computacional. Percebe-se que a ventilação bilateral, por meio de aberturas em superfícies opostas, possibilita o aumento da velocidade de escoamento do fluxo de ar no interior dos ambientes, e a alteração no seu



percurso, conforme se modifica a localização das aberturas (Figura 1. 23)

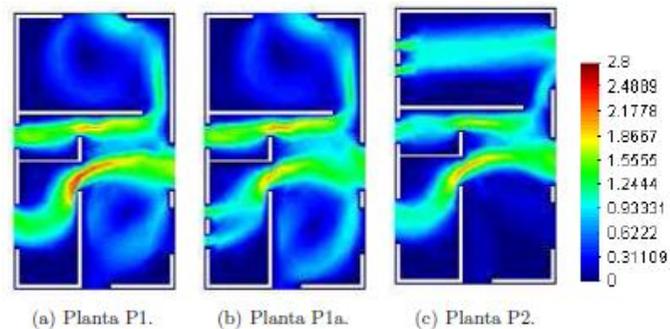


Figura 1. 23 – Avaliação das alterações no campo do vento para diferentes posicionamentos e tamanhos de abertura. Fonte: Drach (2007: pg. 88).

Destaca-se, ainda, que o posicionamento vertical das aberturas (sua altura em relação ao piso) também possui influência sobre a distribuição do fluxo de ar no ambiente. Em modelos ventilados unilateralmente, Favarolo e Manz (2005) constataram que aberturas de mesmo tamanho, e sob as mesmas condições de temperatura do ar interna e externa, posicionadas mais próximas ao forro, possuem melhor desempenho em termos de ventilação em relação a aberturas posicionadas mais próximas

do piso. O estudo ainda constata que o posicionamento vertical das aberturas pode ser mais significativo para a ventilação natural do que o posicionamento horizontal das aberturas em relação às paredes, e a própria área de abertura.

Para efeito de cálculo da ventilação natural, o tamanho das aberturas representa a área efetivamente vazada que permite a entrada ou saída do fluxo de ar. Alguns aspectos desse fator podem ser trabalhados em projeto para otimizar o fluxo de ar no interior dos ambientes. Por exemplo, os estudos de Olgyay (1963) e Givoni (1976) identificam que aberturas destinadas à saída do fluxo de ar, maiores ou equivalentes em relação ao tamanho das aberturas de entrada de ar, são a melhor configuração a ser adotada em termos de eficiência da ventilação no interior do ambiente. Comparando modelos com mesma taxa de abertura, os autores identificaram o maior fluxo de ar interno quando as aberturas possuem tamanhos iguais, e maior velocidade do fluxo quando as aberturas possuem tamanhos diferentes (saída > entrada) (Figura 1. 24).

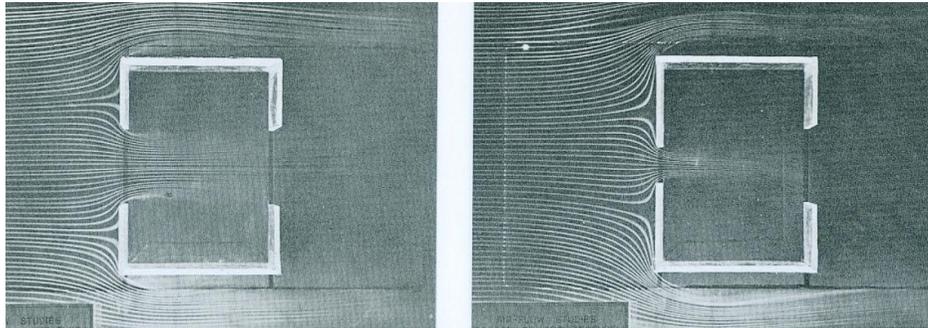


Figura 1. 24 - À esquerda, modelo com configuração de aberturas que favorecem o maior fluxo do ar interno (entrada =saída). À direita, modelo com configuração de aberturas que favorecem a maior velocidade interna do fluxo do ar (saída > entrada). Fonte: Olgygay (1963: pg. 105).

Assim, destacam-se como variáveis identificadas para o desenvolvimento dos diagramas de análise da ferramenta proposta:

- Localização das aberturas para ventilação (unilateral, bilateral/cruzada);
- Direcionamento do fluxo de ar interno nos ambientes;
- Dimensionamento das aberturas conforme sua função quanto a entrada ou saída de ar.

1.2.6. Fatores Internos de Projeto | Divisões Internas e Profundidade da Planta

Por meio da observação dos fatores apresentados anteriormente, pode-se obter um potencial significativo de ventilação natural incidindo sobre o edifício e suas aberturas. Chega o momento de considerar os fatores relativos às divisões internas entre o percurso feito pelo fluxo de ar. A distribuição interna das vedações verticais dos ambientes deve ser estabelecida em projeto de modo a favorecer (facilitar) o percurso do fluxo de ar. Uma vez que, dependendo da localização das divisões internas em relação às aberturas, o fluxo de ar pode sofrer redução na sua velocidade. Tal fato prejudica a ventilação dos ambientes, principalmente daqueles localizados à sotavento em relação à orientação dos ventos predominantes, como menciona Bittencourt e Cândido (2008). Givoni (1976) apresenta o percentual de redução do fluxo de ar em função da configuração das divisórias internas (Figura 1. 25).

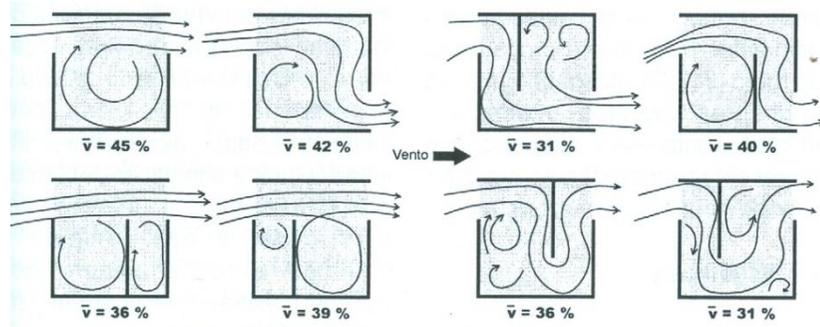


Figura 1. 25 – Interferência das divisões internas dos ambientes na velocidade do fluxo de ar. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 81) adaptado de Givoni (1976).

Conforme a distribuição das divisões internas do projeto, o zoneamento dos ambientes deve ser considerado como outro fator a ser analisado, visando à localização das atividades em função da ventilação. Para Priolo (2002), cozinhas, banheiros e áreas de serviço, por exemplo, são ambientes que devem estar localizados próximos às aberturas destinadas à saída de ar – aberturas à sotavento. Por outro lado, ambientes como salas e dormitórios devem estar localizados próximos às aberturas destinadas à entrada de ar (barlavento). Esse zoneamento em função da ventilação favorece a QIA em ambientes de permanência prolongada, e permite a melhor exaustão dos

poluentes gerados em cozinhas, banheiros e áreas de serviço – uma vez que as áreas de pressão negativa estarão próximas às saídas do fluxo de ar.

Com relação à profundidade da planta dos ambientes, dois aspectos básicos devem ser considerados. O primeiro se baseia em uma constatação da teoria da dinâmica dos fluidos, estabelecendo que quanto maior for a distância a ser percorrida por um determinado fluido, maior deverá ser a pressão exercida sobre esse, para manter seu fluxo inicial (MASSEY e SMITH, 2002). Ou seja, para velocidade constante (pressão constante), a planta baixa que expor sua maior fachada à incidência do fluxo de vento propiciará melhores condições para a manutenção de sua velocidade incidente como velocidade efetiva - uma vez que apresentará a menor distância a ser percorrida pelo fluxo de ar (Figura 1. 26). Dessa forma, quando se trata de plantas retangulares, a orientação das maiores fachadas (menor profundidade da planta) deve favorecer a incidência do vento possibilitando o menor percurso entre as aberturas de entrada e saída do ar.

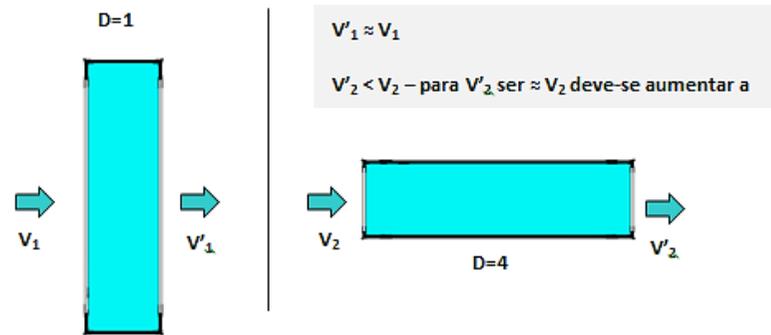


Figura 1. 26 - Relação entre a distância percorrida pelo fluxo de ar e a redução de sua velocidade.

O segundo aspecto a ser observado em relação à profundidade da planta diz respeito a ambientes ventilados por abertura unilateral. Nesse caso, além de depender da diferença de temperatura entre o ar externo e interno, e da localização (vertical) da abertura, a eficiência da ventilação também está ligada à profundidade do ambiente. Autores como Salat e Bourdic (2012) e Ratti *et al.* (2005) estabelecem a chamada “zona passiva” – distância de aproximadamente seis metros imediatamente após a superfície vertical que possui a abertura – como sendo a região onde se pode trabalhar com estratégias passivas de conforto (Figura 1. 27). Ou seja, em ambientes

ventilados unilateralmente, a eficiência da ventilação diminui conforme o aumento da distância em relação à abertura (profundidade do ambiente). Dessa forma, plantas profundas ventiladas unilateralmente reduzem ainda mais a capacidade de obtenção do conforto térmico por ventilação natural.

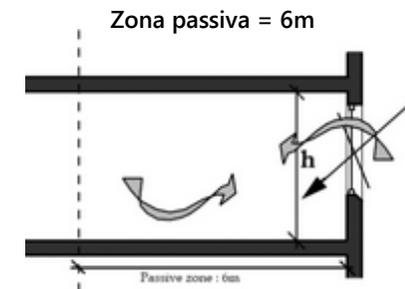


Figura 1. 27 – Zona passiva onde é possível trabalhar com estratégias de ventilação e iluminação natural. Fonte: Ratti *et al.* (2005: pg. 768)

Assim, pode-se destacar como variáveis para o desenvolvimento dos diagramas de análise da ferramenta proposta:

- Distribuição das divisões internas em função do fluxo do ar;



- Zoneamento dos ambientes conforme atividade/uso em função das necessidades de ventilação;
- Profundidade dos ambientes.

1.2.7. Fatores Internos de Projeto | Elementos de Captação e Controle da Ventilação

Elementos desenvolvidos em projeto podem auxiliar na captação do vento para aumentar o fluxo interno do ar. Simples projeções verticais e horizontais, como prolongamento de paredes e coberturas, podem aumentar a captação do vento ou proteger da incidência excessiva, quando for o caso. Esse efeito de captação pode ser maximizado de acordo com o ângulo de incidência do vento sobre a fachada. O estudo desses elementos e seus efeitos é abordado em trabalhos como os de Olgyay (1963), Koenigsberger *et al.* (1977), Aynsley *et al.* (1977), Allard (2002), Bittencourt e Cândido (2008). A Figura 1. 28 exemplifica alguns desses estudos.

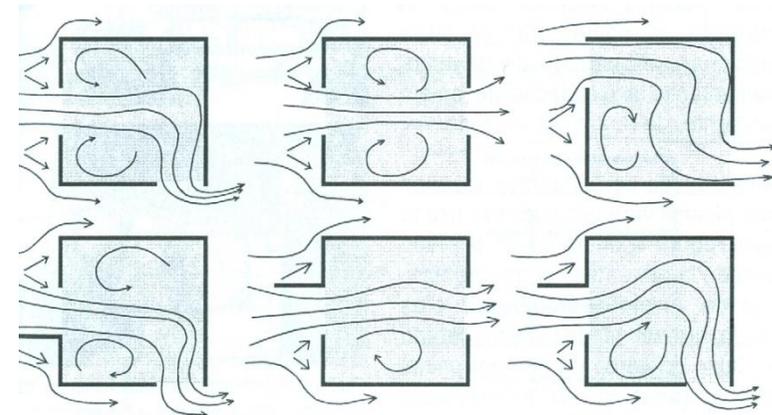


Figura 1. 28 – Projeções no edifício se configurando como elementos de captação do vento. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 77).

Além das projeções verticais e horizontais, captadores de vento posicionados na cobertura de edifícios possuem seu potencial comprovado por estudos como os de Bahadori (1978), Fathy (1986), Priolo (2002), Drach (2007). Segundo Priolo (2002), esses elementos possuem como princípio o teto curvo e as torres de captação de vento (*malkaf*) utilizadas no oriente médio desde 3000 a.c. Basicamente, a técnica consiste na captação do vento na parte mais alta da edificação através de elementos que ressaltam da cobertura, induzindo a entrada do fluxo de ar no ambiente.



De forma semelhante, quando se deseja extrair o ar interno por meio de aberturas no forro/cobertura, estes elementos são posicionados contra o sentido predominante do vento, ou são vazados em todas as suas orientações - aproveitando a diferença de pressão entre o ar interno e a cobertura. Gandemer e Barnaud (1989) realizaram um estudo em túnel de vento quantificando os efeitos da utilização de aberturas (*shed*) para captação e para exaustão do ar. Com a função de permitir a entrada de ar, e em ambientes com ventilação cruzada, o *shed* proporcionou aumento de 15% na velocidade interna do vento. Para a exaustão do ar, foi constatado um aumento aproximado de 40% em sua velocidade (Figura 1. 29).

Em termos de controle da ventilação natural em edifícios, estudos voltados à integração entre o sistema de condicionamento artificial e automação do sistema de ventilação natural vêm ganhando destaque desde a década de 1990 - como abordam Priolo (2002), Heiselberg *et al.* (1998), Santamouris e Wouters (2007). Para o desenvolvimento do projeto, essas soluções possibilitam maior flexibilidade para o aproveitamento da ventilação em termos de proposição de tecnologias. Trabalhos de Knoll (1992) e de Gids (2006) abordam os avanços em termos de componentes da edificação que possibilitam a infiltração do ar

e o seu aproveitamento de forma mais eficiente - desde utilização de venezianas para o controle e direcionamento do fluxo de ar; passando por grelhas de entrada de ar; janelas de deslizamento duplo, que possibilitam a entrada de ar e reduzem a passagem do ruído externo; até sistemas automatizados de ativação das aberturas por controle remoto (Figura 1. 30).

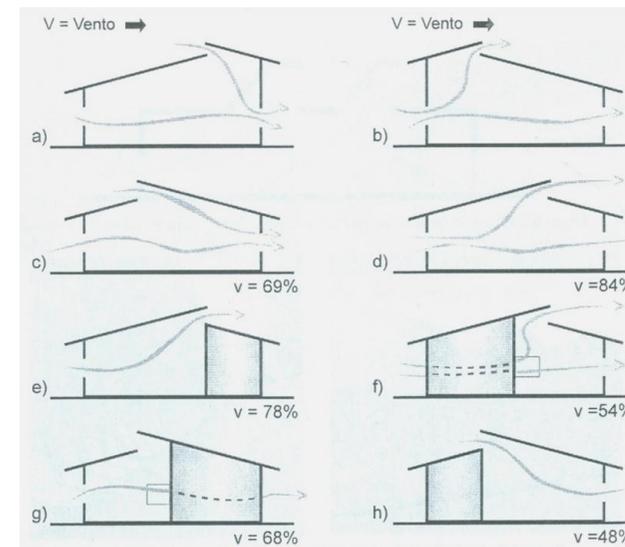


Figura 1. 29 – Efeito da localização do shed no fluxo de ar interno. Fonte: Bittencourt e Cândido (2008: pg. 90) adaptado de Gandemer e Barnaud. (1989).



Figura 1. 30 – Sistema automatizados de abertura de janelas e controle de venezianas. Fonte: www.specifile.co.za (acesso em 25/02/2014)

Assim, pode-se destacar como diretrizes para o desenvolvimento dos diagramas de análise da ferramenta proposta:

- Elementos de captação do vento;
- Elementos que proporcionem o melhor fluxo de ar no interior dos ambientes;

Após a conceituação da QIA e exposição dos Fatores Internos e Externo ao Projeto relacionados à saúde humana e ao conforto térmico dos ocupantes, parte-se para a identificação de parâmetros legais para tais fatores e demais parâmetros que possam subsidiar o desenvolvimento da ferramenta proposta, tema abordado no Capítulo 2.

CAPÍTULO 2

Parâmetros Legais para o Estudo Preliminar de Projeto: Ventilação Natural

Resumo do Capítulo

O presente capítulo identifica os parâmetros legais, presentes na legislação específica aplicável ao desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto, relacionados à QIA e ao CTP. A identificação desses parâmetros ocorre por meio da análise dos principais documentos que compõem a legislação específica aplicável à referida etapa de projeto: os Códigos de Edificações e as Normas Técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Foram levantados, ainda, parâmetros gerais presentes em normas e regulamentações internacionais – importantes em termos de QIA e ventilação natural. Os parâmetros legais identificados neste capítulo, juntamente com os fatores externos e internos de projeto abordados no capítulo anterior, compõem as variáveis a serem analisadas no Diagrama de Ventilação Natural.



OBJETIVOS DO CAPÍTULO 2

O objetivo geral desse capítulo é a identificação de parâmetros legais – no contexto nacional e internacional (normas e regulamentos internacionais de destaque) – relacionados com os fatores de QIA e CTP por meio da ventilação natural, aplicáveis ao desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto. Esses parâmetros serão utilizados para a formação dos itens e variáveis do Diagrama de Ventilação Natural.

Como objetivos específicos, têm-se:

1. Análise comparativa dos parâmetros legais, relacionados com a QIA e o CTP por meio da ventilação natural, no contexto nacional;
2. Análise de parâmetros legais, relacionados com a QIA e CTP por meio da ventilação natural, no contexto internacional;
3. Identificação dos parâmetros legais a serem utilizados no desenvolvimento da ferramenta proposta.

O presente capítulo segue a estrutura apresentada na Figura 2. 1

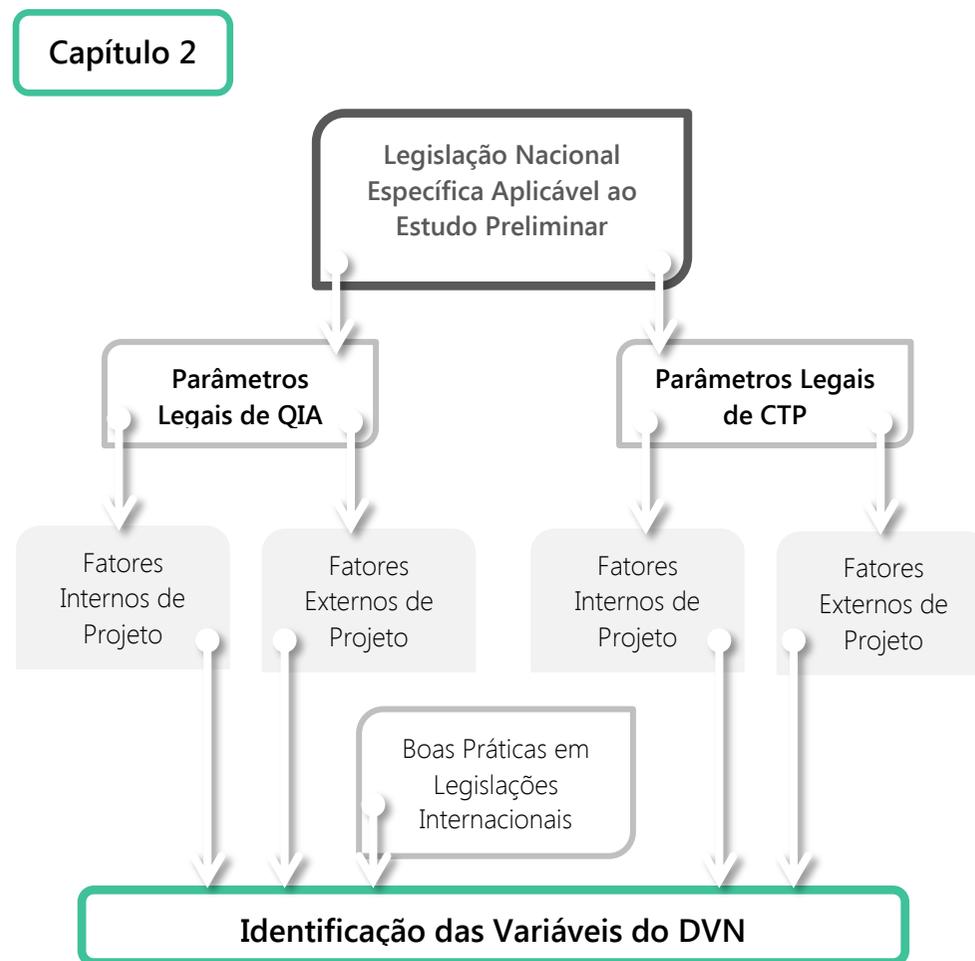


Figura 2. 1 – Estrutura do Capítulo 2



INTRODUÇÃO

A revisão da legislação específica² surge como uma etapa natural na busca por parâmetros legais³ de projeto que possam ter relação com os Fatores Internos e Externos ao projeto identificados no capítulo anterior. A identificação das exigências legais, mínimas ou máximas, presentes na legislação específica, também é importante para o desenvolvimento da ferramenta proposta, pois tais diretrizes podem servir de parâmetro que deverá ser observado pelo projeto. Devem, portanto, formar ou auxiliar na formação das variáveis que comporão parte dos itens e variáveis do Diagrama de Ventilação Natural.

Sob outra ótica, a identificação das exigências presentes na legislação específica também permite que seja realizada sua análise e comparação em relação ao que é considerado pela bibliografia científica como “adequado” em

² Documentos que constituem a legislação urbanística e edilícia em vigor no Brasil (até a data de desenvolvimento deste capítulo – abril de 2014), possíveis de serem aplicados durante o Estudo Preliminar de Projeto e que tenham relação direta com o aproveitamento da ventilação natural.

³ Valores, dimensões, percentuais, ou qualquer informação que quantifique ou traga limites às variáveis inerentes aos fatores de projeto identificados.

termos de potencial de aproveitamento e favorecimento da ventilação natural no desenvolvimento do projeto – aspectos referentes aos fatores abordados no capítulo anterior. A partir dessa análise e comparação, torna-se possível estabelecer uma base sólida para a identificação de variáveis que irão compor o DVN.

Pode-se mencionar como exemplos de documentos legais que compõem a legislação específica a ser abordada nesta tese: Códigos de Edificações (CE's)⁴ e normas técnicas (NBR's) da ABNT. As normas técnicas da ABNT, para efeito deste trabalho, foram incluídas nesse conceito devido à exigência de conformidade do projeto em relação a elas – imposta, principalmente, pelos Códigos de Edificações.

Tendo em vista os objetivos gerais da tese, optou-se por um recorte quanto à análise da legislação específica, partindo-se do entendimento de que determinados documentos (como os CE's e NBR's) possuem relação mais direta com o desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto. Da mesma forma, como o DVN possibilitará a análise de um determinado número de cidades brasileiras, foram levantados e analisados os

⁴ Em determinados estados do Brasil este documento também pode ser denominado de Código de Obras e Edificações (COE).



CE's, e leis equivalentes, das vinte e sete capitais brasileiras. Dessas, sete foram escolhidas para compor o DVN neste primeiro momento (como aborda o Capítulo 4), e as demais serão inseridas em um momento futuro. Em suma os documentos analisados estavam em vigor até a data do fechamento do presente capítulo, sendo eles:

- Lei Ordinária de Rio Branco, nº 1732 de 2008;
- Lei Municipal nº 5.593 de 2007 – CE de Maceió;
- Lei Complementar nº 031 de 2004 – CE de Macapá;
- Lei Ordinária de Manaus nº 1208 de 1975;
- Lei nº 3.903/1988 – CE de Salvador;
- Lei nº 5.530/1981 – CE Fortaleza;
- Lei nº 2.105/1998 – CE de Brasília;
- Lei nº 4.821/2008 – CE Vitória;
- Lei Complementar nº 177 de 2003 – CE Goiânia;
- Lei nº 1.790/1968 – Código de Posturas do Maranhão;
- Lei Complementar nº 102 de 2003 – CE de Cuiabá;
- Lei nº 1.866/1979 – CE Campo Grande;
- Lei nº 9.725/2009 – CE Belo Horizonte;
- Lei nº 7.400/1988 – CE Belém;
- Lei nº 1.347/1971 – CE João Pessoa;
- Decreto nº 212/2007 – CE Curitiba;
- Lei nº 7.427/1961 – Código de Urbanismo e Edificações do Recife;
- Lei Complementar nº 3.608 de 2007 – CE Teresina;
- Código de Obras do Rio de Janeiro (2007);
- Lei Complementar nº 284 de 1992 – CE Porto Alegre;
- Lei Complementar nº 055 de 2004 – CE Natal;
- Lei nº 63/1973 – CE Porto Velho;
- Lei nº 18/1974 – Código de Posturas de Boa Vista;
- Lei Complementar nº 060 de 2003 – CE Florianópolis;
- Lei nº 11.228/1992 – CE São Paulo;
- Lei nº 13/1966 – CE Aracajú;
- Lei nº 045/1990 – CE Palmas;
- NBR 15.220-3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e diretrizes de projeto para habitações de interesse social;
- NBR 15.575-1: Edificações Residenciais – Performance parte 1 | requisitos gerais;
- NBR 15.575-4: Edificações Residenciais – Performance parte 4 | sistema de vedações verticais internas e externas;
- NBR 13.531: Elaboração de Projetos de Edificações: Atividades técnicas | requisitos gerais.

Especificamente para os CE's, após o levantamento e análise, foi feito um exercício comparativo entre os parâmetros legais exigidos para as diferentes capitais brasileiras e entre normas técnicas. O objetivo foi identificar a "filosofia" dos CE's e



das normas - aspecto importante para a QIA e CTP, como abordam Wouters *et al.* (2006) -, ou seja, se os CE's se configuram como puramente "descritivos" ou são "baseados no desempenho" do projeto/edifício. Segundo Wouters *et al.* (2006), normas ou regulamentos descritivos são aqueles que não se expressam em termos de níveis máximos ou mínimos, mas em termos de variáveis, as quais presume-se que tenham relação com tais níveis – a exemplo da determinação do tamanho da abertura por meio da fração de área de piso do ambiente. Já as normas ou regulamentos baseados no desempenho estabelecem os níveis de desempenho que devem ser alcançados pelo projeto/edifício. É o que ocorre, por exemplo, ao se determinar que o ambiente não ultrapasse um nível máximo de concentração de poluentes no ar, ou que assegure um percentual mínimo de horas de conforto térmico – independentemente das variáveis periféricas envolvidas.

Sob este ponto de vista, normas e regulamentos baseados no desempenho são mais adequadas para o desenvolvimento do projeto quando se busca o melhor desempenho quanto à QIA e ao CTP. Essas normas dão liberdade ao projetista e, ao mesmo tempo, exigem a comprovação do desempenho mínimo estabelecido por meio da consideração dos

fatores de projeto envolvidos. Por outro lado, normas e regulamentos descritivos exigem o cumprimento de parâmetros gerais, que podem estar subdimensionados ou superdimensionados, dependendo do caso, o que não assegura desempenho ideal.

Normas e regulamentos baseados no desempenho estão sendo cada vez mais desenvolvidos e aplicados em países com notória liderança em termos de QIA – como, por exemplo, Finlândia, Noruega, Estados Unidos, Canadá, Alemanha e o Reino Unido. Em vista disso, é importante que se analise os principais documentos que compõem a legislação específica desses países. Tal análise viabiliza a identificação de possíveis pontos comuns e pontos discordantes em relação à legislação específica brasileira, além de fornecer subsídios para a elaboração de variáveis na construção da ferramenta que se propõe.

Por fim, é importante destacar que o conjunto de leis e normas aplicáveis no desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto pode representar um importante instrumento para favorecer a QIA e o CTP nas edificações residenciais por meio da ventilação natural. No entanto, como destaca Wouters *et al.* (2006), o desempenho do sistema de ventilação em termos de QIA e CTP não depende somente dos parâmetros de referência



legais aplicáveis no processo de desenvolvimento do projeto – recorte a ser abordado nesta tese. Depende, também, de parâmetros de referência que assegurem a performance dos demais componentes utilizados na sua instalação/funcionamento (esquadrias, venezianas, brises, etc.), da qualidade da execução do projeto, e da operação e manutenção do sistema por parte dos usuários (Figura 2. 2).

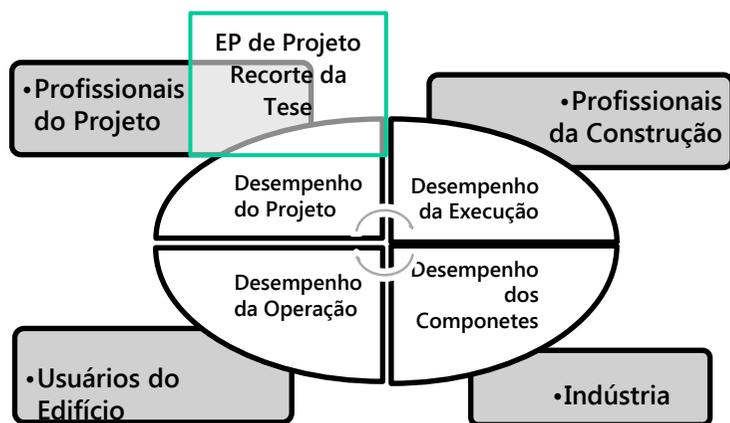


Figura 2. 2 - Aspectos envolvidos no desempenho do sistema de ventilação do edifício. Fonte: adaptado de Wouters *et al.* (2006, p. 286).

2. LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO PRELIMINAR DE PROJETO

Os CE's e normas técnicas brasileiras trazem parâmetros que devem ser cumpridos para a aprovação do projeto junto às instâncias responsáveis. Portanto, é de se esperar que o cumprimento de tais parâmetros, muitas vezes parâmetros mínimos, favoreça o alcance de níveis mínimos de QIA e CTP na edificação, em conformidade com os princípios e objetivos que, de forma geral, são descritos nos documentos. O texto do CE de Brasília exemplifica trechos e palavras (em destaque) comuns a todos os CE's analisados.

O CE-DF possui como objetivo:

[...] **estabelecer padrões de qualidade** dos espaços edificados que satisfaçam as condições mínimas de segurança, **conforto, higiene, saúde** e acessibilidade **aos usuários** e demais cidadãos [...] por meio de **parâmetros técnicos** que serão observados pela administração pública e pelos demais interessados no projeto (grifos nossos).

Lei nº 2.105 de outubro de 1998 - CE-DF (p.01)



As normas técnicas, em sua descrição geral, também trazem palavras e intensões semelhantes aos CE's:

[...] **estabelecer**, em relação a problemas existentes ou potenciais, **prescrições destinadas à utilização comum e repetitiva com vistas a obtenção do grau ótimo em um dado contexto**. Objetivando **proteger a vida humana**; prover a sociedade meios eficazes para **aferir a qualidade dos produtos**. (grifos nossos)

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (disponível em: http://www.abnt.org.br/m3.asp?cod_pagina=931)

Em termos de abrangência de aplicação no desenvolvimento do Estudo Preliminar, os CE's disciplinam toda e qualquer obra de engenharia e arquitetura, assim como seu licenciamento – desde o projeto até a demolição do edifício. Os CE's se articulam com as normas técnicas e outros documentos legais, direcionando o projetista a consultá-los. Assim, a presente tese caracteriza os CE's como os principais documentos para o desenvolvimento do Estudo Preliminar do projeto de Arquitetura.

As normas técnicas (NBR's) são citadas pelos CE's como os documentos com os quais o projeto deve estar em conformidade – inclusive, em alguns casos – por exemplo, CE-DF,

CE-SP, CE-SC, entre outros – apresentam exigências claras quanto à obrigatoriedade de observância de determinadas NBR's (ex.: NBR's referentes à acessibilidade e combate a incêndio). No entanto, para outras NBR's tal obrigatoriedade não está claramente expressa (ex.: NBR 15.220-3, que versa sobre o desempenho térmico de edificações e Zoneamento Bioclimático Brasileiro). Nesse contexto, foi realizado o cruzamento entre os parâmetros legais exigidos pelos CE's e aqueles presentes nas normas técnicas relacionadas com a QIA e o CTP por meio da ventilação natural.

2.1. Parâmetros Legais para a QIA – Saúde Humana

Um aspecto importante para compreender a filosofia da legislação específica levantada é sua data de publicação. Para Addington (2001), o início do reconhecimento da relação entre a ventilação dos edifícios e a qualidade interna do ar data do ano de 1989 – com a revisão da norma ASHRAE 62-1981. Antes disso, de forma geral, os padrões mínimos de ventilação visavam atender apenas ao balanço dos dois principais componentes



relacionados à respiração humana – oxigênio e o dióxido de carbono. No Brasil, a QIA em edificações passou a ser legalmente abordada a partir de 1998, ano em que a MS 3523 foi publicada. Mesmo se referindo a ambientes climatizados artificialmente, tal abordagem traça um paralelo próximo ao conceito de QIA baseada na ventilação natural, como apresentado no Capítulo 1.

É importante destacar que tal fato não significa afirmar que os projetos desenvolvidos anteriormente a esse período são inadequados sob o ponto de vista da QIA, sejam eles ventilados naturalmente ou climatizados artificialmente. Também não se pode afirmar que todos os projetos desenvolvidos posteriormente à publicação da MS 3523 assegurem por completo níveis adequados de QIA no Brasil. O que se pode afirmar, é que a publicação desse documento representou um marco em termos de responsabilidade do projetista e dos órgãos de fiscalização, com a finalidade de assegurar os aspectos de QIA estabelecidos.

Os CE's, ao buscarem minimamente disciplinar a qualidade dos espaços em termos de conforto, higiene e salubridade, são os principais documentos legais que apresentam parâmetros de projeto para favorecer a QIA. A relação entre a data de suas publicações e a data de publicação da MS 3523 indica, em determinados casos, um lapso considerável de tempo

entre os documentos. Por exemplo, a MS 3523 foi publicada trinta e um anos após a publicação do texto original do CE de Brasília (Decreto nº 596 de 1967) e vinte e nove anos após a publicação do CE das Cidades Satélites do Distrito Federal (Decreto nº 944 de 1969), ambos substituídos pelo CE-DF vigente (Lei nº 2105 de 1998). No entanto, no CE-DF vigente, parâmetros de projeto fundamentais para favorecer a QIA permanecem inalterados desde a publicação do seu texto original (ex.: área das aberturas).

A defasagem em relação à documentação legal do conceito de QIA no Brasil não é identificada somente no CE-DF. Por exemplo, quatorze, dos vinte e sete códigos de edificações vigentes nas capitais brasileiras, foram publicados antes de 1998 (Gráfico 2. 1). A partir dessas observações, nota-se que a adoção dos parâmetros legais de projeto presentes nos códigos de edificações deve ser tomada com cautela.

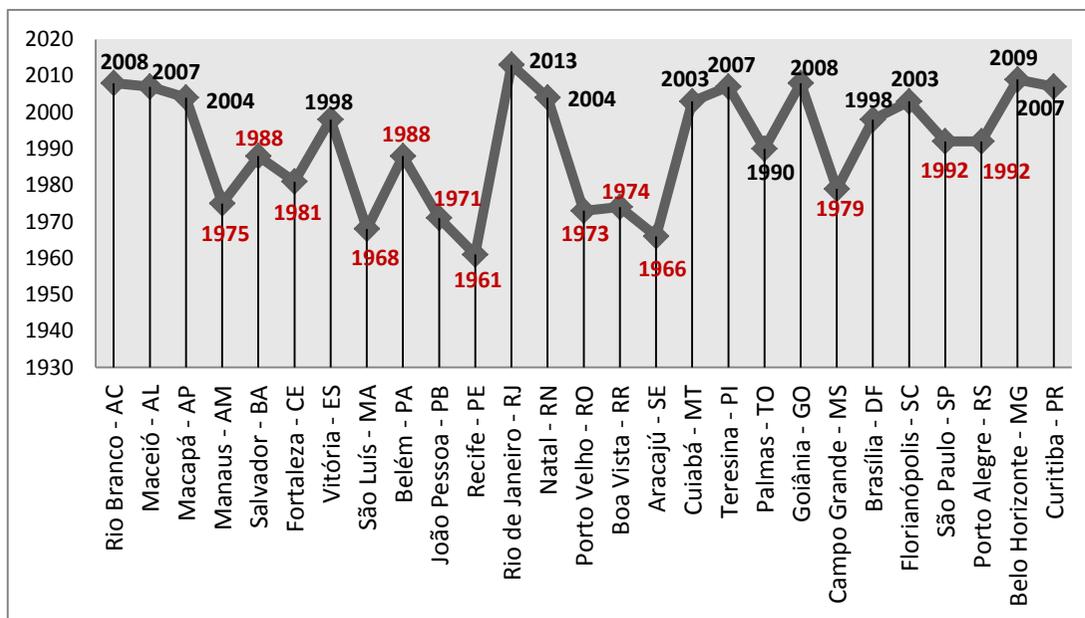


Gráfico 2.1 – Ano de publicação dos CE's vigentes nas capitais brasileiras⁵.

Outro fator importante, que indica a filosofia adotada na legislação específica, é o estabelecimento das exigências em termos de variáveis relacionadas à QIA – como afastamentos mínimos ou área mínima de abertura. Ou seja, os documentos não se expressam por meio de níveis de performance. Observando esses aspectos, conclui-se que a legislação específica, referente aos CE's, pode ser caracterizada como "descritiva".

Essas observações gerais auxiliam na filtragem dos parâmetros a serem utilizados no desenvolvimento da ferramenta proposta – tendo em vista a inadequação de alguns parâmetros quanto ao favorecimento da QIA por meio da ventilação natural. A análise dos parâmetros de referência identificados na legislação

⁵ Nas capitais São Luís – MA e Boa Vista – RR, foi considerado o Código de Posturas do Município, pelo fato de não existir CE ou não estar disponível.



específica, em relação aos Fatores Externos e Internos ao Projeto, é abordada nos tópicos seguintes.

2.1.1. Fatores Externos ao Projeto

As características do clima, ocupação e atividades desenvolvidas no entorno, foram os primeiros Fatores Externos ao Projeto a serem considerados no desenvolvimento do Estudo Preliminar, visando favorecer a QIA sob o ponto de vista da saúde humana. A consideração desses fatores está relacionada à identificação do potencial de aproveitamento da ventilação natural para favorecer níveis adequados de concentração de poluentes nos ambientes da futura edificação.

Com relação às características do clima, os CE's brasileiros não estabelecem diretamente parâmetros que devam ser observados pelo projetista – tais parâmetros são encontrados nas normas NBR 13.531, NBR 15.220-3 e NBR 15.575-4. A NBR 15.220-3 trata do Zoneamento Bioclimático Brasileiro e especifica oito Zonas Bioclimáticas (Figura 2. 3). Para cada zona, a NBR

15220-3 especifica estratégias voltadas para o desempenho térmico da edificação, considerando as características climáticas distintas ao longo do ano – inverno frio, com umidade relativa do ar mais baixa; verão quente, com maior umidade relativa do ar.

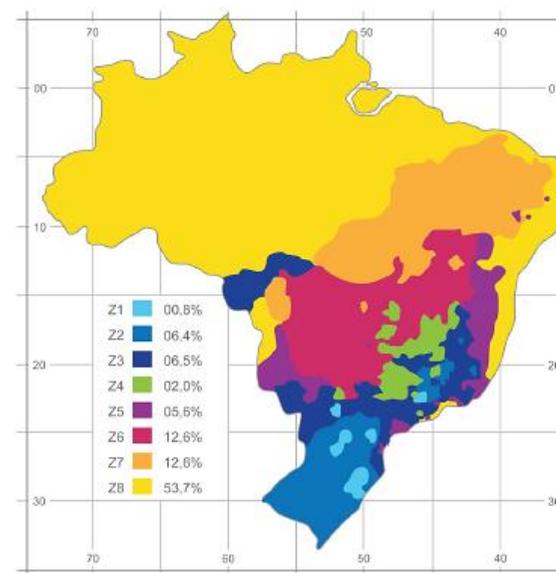


Figura 2. 3 – Zoneamento Bioclimático brasileiro seguindo a NBR 15.220-3.
Fonte: NBR 15220-3 adaptado por Campanhoni (2012, p. 46).



No que se refere aos Fatores Externos ao Projeto relacionados à QIA, visando à saúde humana, o conteúdo exposto pela NBR 15220-3 deve ser observado quanto à identificação da Zona Bioclimática e caracterização do clima (sob seus aspectos de temperatura e umidade do ar). Assim, é possível identificar períodos em que a combinação desses elementos favorece o desenvolvimento de agentes poluentes em ambientes mais suscetíveis à sua concentração – como banheiros e cozinhas. No caso do Brasil, segundo as Normas Climatológicas Brasileiras do INMET (período de 1961 a 1990), o período com temperatura e umidade relativa do ar elevadas se estende entre os meses de primavera e verão no hemisfério sul (setembro à fevereiro). Sendo assim, nesse período deve ser dada especial atenção à possibilidade de aumento do fluxo de ar na habitação, tanto para reduzir a concentração de poluentes (decorrentes de mofo e fungos), quanto para favorecer o conforto térmico dos usuários.

Em relação aos fatores de projeto relacionados à ocupação e às atividades desenvolvidas no entorno, nos CE's analisados não foi possível identificar a existência parâmetros legais que fazem menção direta aos mesmos. Grosso modo, uma relação com os Fatores Externos ao Projeto pode ser observada em outros documentos citados pelos CE's – a serem observados

pelo projetista (ex.: Leis de Uso e Ocupação do Solo). Dentre outros aspectos, esses documentos buscam disciplinar o uso do solo de acordo com a atividade a ser desenvolvida. Em termos de QIA visando à saúde humana, essa ordenação é importante para separar setores destinados à habitação de setores com grande concentração de atividades de comércio, indústrias e estação de tratamento de resíduos – que são potencialmente geradores de poluentes que interferem na qualidade do ar.

Com a ausência de parâmetros de referência em termos de Fatores Externos ao Projeto visando favorecer a QIA, deve-se destacar a necessidade de complementação de informações durante a Etapa de Levantamento do projeto. Isso porque, o conhecimento de informações básicas, como as atividades desenvolvidas no entorno do sítio onde o projeto será desenvolvido, é fundamental para a análise em termos de qualidade interna do ar e ventilação natural. A etapa inicial faz parte do Estudo Preliminar (Figura 2. 4), como dispõem as NBR 13.531. Nessa etapa se exige do projetista a coleta de informações como:



Etapa destinada à coleta das informações de referência que representam as condições preexistentes, de interesse para instituir a elaboração do projeto, podendo incluir os seguintes dados: - ambientais, climáticos, ecológicos; - outros.

NBR 13.531 (ABNT, 1995, p.4)

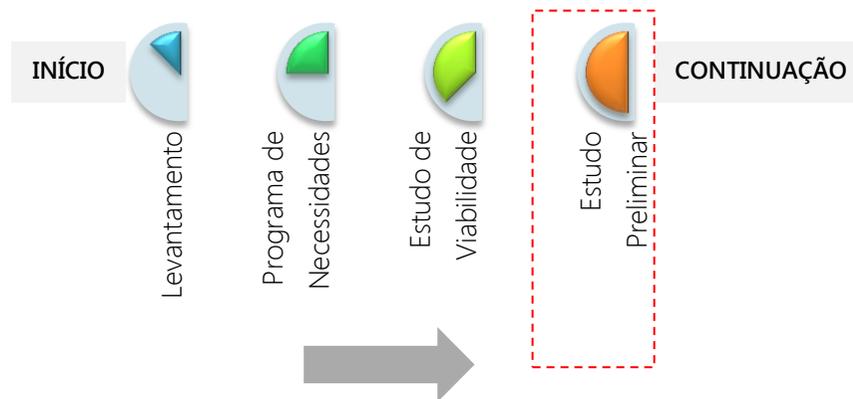


Figura 2. 4 - Etapas iniciais do processo de elaboração do projeto de arquitetura: Fonte: adaptada da NBR 13.531.

A norma NBR 13.531 apresenta a descrição das etapas de desenvolvimento do projeto, caracterizando:

- **Programa de Necessidades (PN):** etapa em que se deve determinar as exigências de caráter prescritivo ou de desempenho, em termos de necessidades e expectativas dos usuários, a serem atendidas pela edificação a ser concebida.
- **Estudo de Viabilidade (EV):** etapa destinada à análise e avaliação do projeto, visando à seleção e à recomendação de alternativas – diretrizes.
- **Estudo Preliminar (EP):** etapa destinada à concepção e à representação das informações técnicas iniciais aproximadas, necessárias à compreensão da edificação e podendo conter “soluções alternativas”.

Nota-se que nas etapas iniciais de desenvolvimento do projeto, que convergem para o Estudo Preliminar, as informações devem ser levantadas (Lv), as exigências de desempenho e necessidades dos usuários devem ser determinadas (PN), a análise e a avaliação devem ser realizadas, e diretrizes devem ser propostas (EV) – para a concepção e



representação inicial do projeto (EP). Os aspectos de QIA, abordados nesta tese, estão envolvidos em todo esse processo, assim como a importância da ferramenta de análise proposta. Uma vez alimentada pelas informações coletadas na etapa de Levantamento, e identificadas as exigências/necessidades/desempenho para atender ao usuário, a ferramenta proposta auxiliará na análise e identificação de diretrizes para a elaboração do Estudo Preliminar.

Observando a descrição da etapa de Levantamento (Lv), aspectos climáticos e microclimáticos específicos de cada sítio devem ser observados de forma a complementar as informações necessárias ao desenvolvimento do Estudo Preliminar na ausência de parâmetros legais. A partir de então, podem ser melhor estimadas as necessidades de controle da temperatura, umidade e ventilação nos ambientes mais propensos à geração e à concentração de poluentes. Da mesma forma, outros aspectos relativos à ocupação e às atividades desenvolvidas no entorno podem ser relacionados com a concentração de poluentes no ar externo (ex.: arborização do entorno e sítios em consolidação propensos a concentração de material particulado no ar).

Em resumo, para os Fatores Externos ao Projeto que busquem favorecer a QIA para a saúde humana foram identificados os parâmetros legais apresentados no Quadro 2. 1.

Quadro 2. 1 - Parâmetros de referência identificados em termos de Fatores Externos de Projeto QIA – saúde humana

Parâmetro de referência	Documento	Considerações
Zoneamento Bioclimático	NBR 15220-3	Devem ser observadas as características climáticas da região e microclimáticas de cada sítio
Levantamento Inicial	NBR 13531 NBR 13532	Devem ser observados os dados obtidos no levantamento inicial em termos ambientais e climáticos da região e do entorno onde o projeto será desenvolvido.



2.1.2. Fatores Internos ao Projeto

Identificou-se que os parâmetros legais presentes nos CE's, quanto ao dimensionamento mínimo das aberturas, possuem como base a fração de área de piso do ambiente. Apesar de haver uma diferenciação quanto ao tipo de uso do ambiente, não foi possível identificar os critérios adotados pelos CE's para determinar essas frações, ou o tamanho mínimo dos ambientes. Por outro lado, é possível afirmar que o potencial de geração e concentração de poluentes no ar não foi considerado como aspecto para a determinação dos parâmetros identificados. Para ambientes de "cozinha" – ambiente crítico em termos de geração e concentração de poluentes – permitem-se tamanhos mínimos de abertura significativamente inferiores em relação a salas e dormitórios. Como visto no Capítulo 1, essa diferença no tamanho das aberturas não é o cenário mais adequado quanto se trata de QIA.

Utilizando como exemplo o CE da cidade de Palmas, a Tabela 2. 1 apresenta a comparação dos parâmetros de referência estabelecidos para o dimensionamento mínimo das aberturas em habitações. Quando consideramos o percentual de abertura efetiva – que corresponde à área vazada da abertura

por onde ocorrem as trocas de ar, excluindo as superfícies opacas e translúcidas – o tamanho mínimo da abertura pode ser significativamente menor. O CE de Palmas especifica como parâmetro legal 50% para o cálculo da abertura efetiva. Ou seja, permite uma abertura efetiva de 0,12 m². Analisando os demais CE's 50% é o parâmetro que representa a média das áreas de abertura efetiva na maioria dos documentos que especificam tal valor – com exceção para os CE's de Macapá (70%) e Porto Velho (65%), como mostra o Gráfico 2. 2.

Tabela 2. 1 – Parâmetros de referência para o dimensionamento de aberturas por tipo de ambiente conforme o COE-DF.

Ambiente	Área Mínima do Ambiente (m ²)	Fração da abertura	Tamanho mínimo de abertura permitido
Sala	9	1/6	1,50
Dormitório	9	1/6	1,50
Cozinha	5	1/8	0,60
Banheiro	2	1/8	0,25

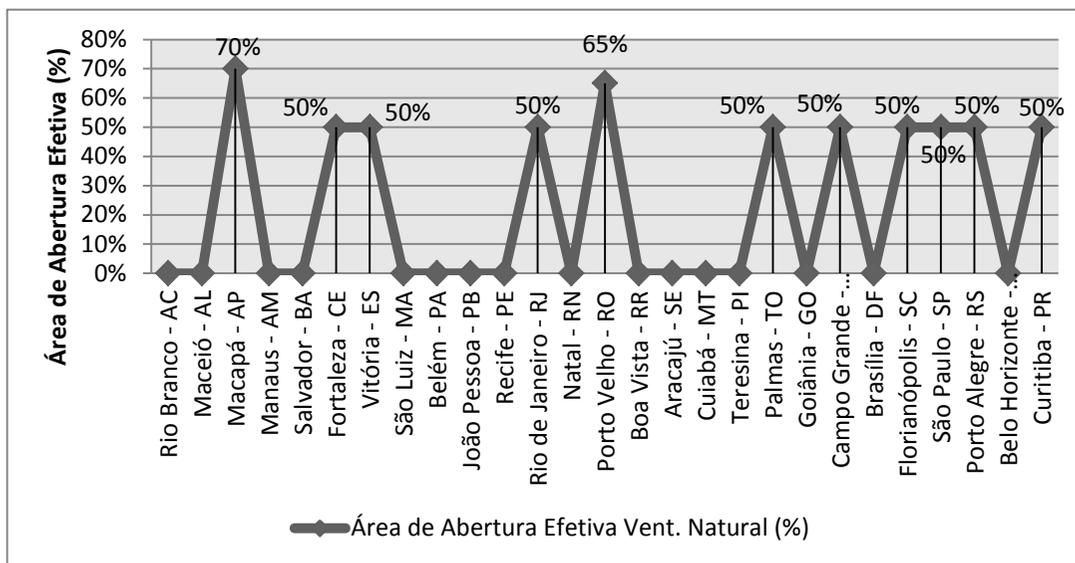


Gráfico 2. 2 - Percentual de abertura efetiva identificados nos CE's⁶.

Tomando referido percentual médio como referência (50%), o tamanho mínimo permitido para a abertura no Distrito Federal pode chegar a 0,30 m² para cozinhas e 0,075 m² para banheiros. Com base nesses valores, pode-se imaginar o seguinte exemplo: uma habitação localizada Distrito Federal, com uma cozinha de 5 m² (área mínima permitida), pé-direito de 2,50 m (pé-direito mínimo permitido), e utilizando procedimentos básicos de cálculo de renovações de ar por hora para ambientes ventilados unilateralmente (SWAMI e CHANDRA, 1987), fica extremamente dependente da diferença de temperatura entre o

ar externo e o ar interno para atender aos 25 l/s por pessoa – número de renovações de ar por hora considerado como limite de risco à saúde humana, definidos por Wargocki *et al.* (2002).

Além disso, os parâmetros legais apresentados pelo CE-DF entram em conflito com os parâmetros estabelecidos pela NBR 15.220-3, uma vez que a norma apresenta como diretriz de projeto para a Zona Bioclimática 4 (ZB4) o dimensionamento de aberturas “Médias”, que representa percentual entre 15% e 25% da área de piso do ambiente.

⁶ Foi considerado “0” para os CE’s que não especificam o percentual de abertura.



A Tabela 2. 2 apresenta a diferença entre os valores mínimos permitidos pelo CE-DF e propostos pela NBR 15220-3.

Tabela 2. 2 – Comparação entre os parâmetros de tamanho de abertura presentes no COE-DF e na NBR 15220-3.

Ambiente	COE-DF			NBR 15.220-3		
	Área Mínima (m ²)	Tamanho mínimo de abertura	50% de abertura efetiva	T _{ma} - 15% NBR 15220	T _{ma} - 25% NBR 15220	50% de abertura efetiva
Sala	12	1,50	0,75	1,80	3,00	0,90 / 1,50
Dormitório	8	1,00	0,50	1,20	2,00	0,60 / 1,00
Cozinha	5	0,6	0,30	0,75	1,25	0,37 / 0,62
Banheiro	1,6	0,15	0,07	0,24	0,40	0,12 / 0,20

T_{ma} – Tamanho Mínimo da Abertura em função da área de piso

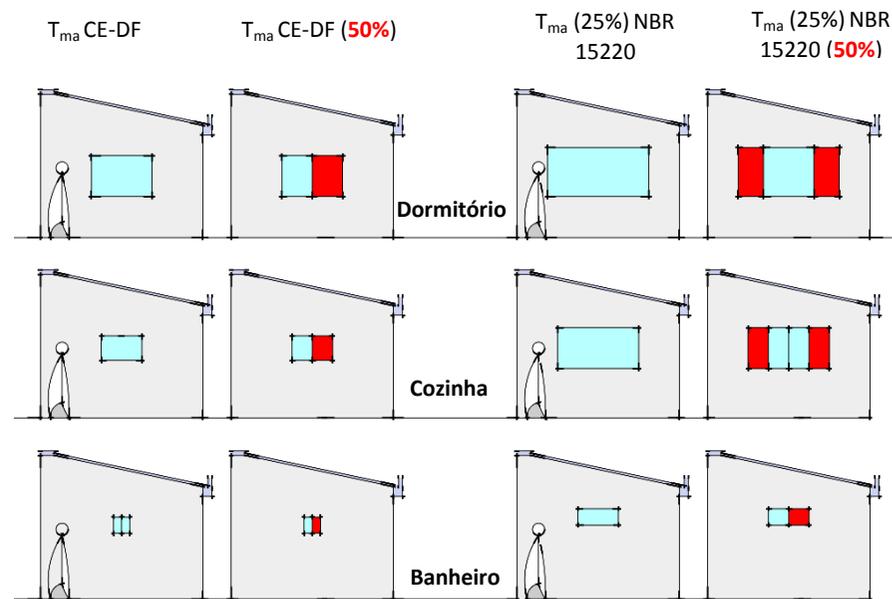


Figura 2. 5 - Comparação entre a área mínima de abertura recomendada para dormitórios, cozinhas, banheiro, pelo CE-DF e área mínima recomendada pela NBR 15220-3.

A área de abertura permitida pelo CE-DF chega a ser 50% menor em relação ao tamanho mínimo recomendado pela NBR 15.220-3 (Figura 2. 5). Para banheiros, essa diferença representa mais que o dobro de área de abertura. Importante destacar que a área de abertura representa um fator importante para o número de renovações de ar por hora, fazendo parte de um conjunto de outros fatores. Assim, é o mais correto, a



princípio, adotar como parâmetro legal o dimensionamento da área mínima da abertura com base na NBR 15.220-3 para o desenvolvimento do Estudo Preliminar. No entanto, a depender dos demais fatores de projeto, esse parâmetro pode ou não favorecer níveis adequados de QIA.

Com relação à localização dos ambientes, obedecendo um zoneamento com base na QIA, cozinhas e banheiros devem ser alocados à sotavento no projeto, de acordo com a orientação predominante da ventilação natural no sítio. Referidos ambientes devem, ainda, possuir abertura de tamanho igual ou maior do que as aberturas localizadas à barlavento. Não foram encontrados parâmetros legais para esses fatores de projeto nos documentos analisados.

No que diz respeito aos materiais que compõem as superfícies de ambientes como banheiros e cozinhas, devem ser propostos com vistas a minimizar a proliferação de fungos e bactérias. Nenhum parâmetro legal foi identificado com relação a esse fator. Determinados CE's apenas fazem menção à observação dos materiais especificados no projeto com relação ao seu isolamento sonoro, resistência contra a propagação do fogo, e função estrutural.

Por fim, é importante destacar que limites aceitáveis de concentração de poluentes estão elencados na RE nº 09 da ANVISA, segundo a qual os principais agentes responsáveis pela contaminação do ar são: dióxido de carbono (CO₂), aerodispersóides (partículas de uma determinada substância dispersa no ar), e agentes microbiológicos. Para efeito da presente tese, assume-se que os parâmetros apresentados na RE nº 09 podem ser utilizados como parâmetros legais de projeto mesmo se referindo a edifícios climatizados artificialmente. Isso porque, ambientes públicos ou coletivos representam cenário mais crítico, sob o ponto de vista da QIA, em relação aos ambientes residenciais. Dessa forma, se os valores mínimos apresentados são aceitáveis para um cenário com maior exigência, tais valores atenderão cenários com exigência menor ou igual. A Tabela 2. 3 apresenta um resumo dos padrões de referência presentes na RE nº 09.



Tabela 2. 3 – Parâmetros legais quanto ao nível de concentração de poluentes presentes na RE nº09 da ANVISA para QIA – Saúde Humana.

Valor Máximo Recomendável – Contaminação Microbiológica por Fungos	a) $\leq 750 \text{ ufc/m}^3$ b) É inaceitável a presença de fungos patogênicos e toxigênicos.
Valores Máximos Recomendáveis – Contaminação Química	a) $\leq 1000 \text{ ppm}$ de dióxido de carbono (CO_2)** b) $\leq 80 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ de aerodispersóides totais no ar***

* valor para a relação $I/E \leq 1,5$, onde "I" e "E" representam a quantidade de fungos no ambiente interior e exterior respectivamente.

** indicador de renovação de ar externo recomendado para conforto e bem estar.

*** indicador do grau de pureza do ar e limpeza do ambiente climatizado.

Em resumo, para os Fatores Internos de Projeto, tendo em vista a QIA – saúde humana – foram identificados os seguintes parâmetros legais com as devidas considerações (Quadro 2. 2).

Quadro 2. 2 - Parâmetros identificados em termos de Fatores Internos de Projeto QIA – saúde humana.

Parâmetro de referência	Documento Adotado	Considerações
Dimensionamento Mínimo das Aberturas	NBR 15220-3	Deve ser observado o dimensionamento proposto pela norma, considerando, ainda, o percentual abertura efetiva.
Níveis de concentração de poluentes	RE Nº 09 - ANVISA	Devem ser considerados para contaminação química e microbiológica.

2.2. Parâmetros Legais para o Conforto Térmico Passivo

2.2.1. Fatores Externos ao Projeto – Fatores Climáticos Globais e Locais

Conforme abordado anteriormente, é possível encontrar parâmetros legais a respeito do clima na norma NBR 15.220-3, como fatores de projeto visando favorecer o conforto térmico. Para cada Zona Bioclimática a norma apresenta diretrizes



de projeto a serem utilizadas, objetivando o conforto térmico dos ocupantes. Essas estratégias consideram os aspectos gerais do clima da região nos períodos de inverno e verão.

Analisando as diretrizes apresentadas pela NBR 15.220-3 para as diferentes ZB's, observa-se que a ventilação natural para o conforto térmico é determinada para 99,2% do território brasileiro enquanto estratégia passiva para o período de verão. As maiores restrições estão para as cidades localizadas na ZB 1 – devido às baixas temperaturas durante o inverno -, e para as horas do dia em que o “condicionamento passivo seja insuficiente” (horas mais quentes do dia durante o verão). Precauções quanto à baixa umidade do ar, principalmente nas cidades localizadas nas ZB's 4, 6 e 7, devem ser consideradas como complemento da ventilação, sendo proposta pela norma a estratégia de “resfriamento evaporativo”.

Tendo em vista que a temperatura do ar é aspecto importante para favorecer o CTP, o projetista deve observar o clima de cada região / Zona Bioclimática. Ou seja, os níveis de temperatura externa do ar devem ficar dentro do limite determinado na carta de Conforto Adaptativo (entre 10°C – 33°C, segundo Brager e de Dear, 2001), para que o potencial da ventilação natural seja efetivo em termos de conforto térmico.

Considerando que a temperatura média anual varia de 13°C (nas regiões mais frias) a 27 °C (nas regiões mais quentes)⁷ – pode-se considerar que todas as ZB's possuem potencial de aproveitamento da ventilação natural para o CTP ao longo do ano (Figura 2. 6).

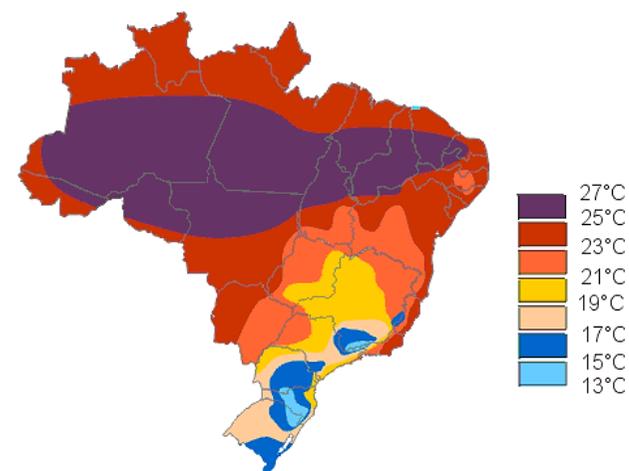


Figura 2. 6 – Temperaturas medias anuais no território brasileiro. Fonte: http://www.geocities.ws/neygeo/clima_brasileiro.html (acesso em 10/01/2015).

⁷ As informações fornecidas pelo site geocities.com, do qual foi extraída a Figura 2. 6, foram comparadas com as Normais Climatológicas do Brasil (1961 – 1990), sendo coerentes entre si.



Dessa forma, mesmo nas regiões com temperaturas médias do ar mais elevadas, a ventilação natural possui potencial para ser utilizada, visando favorecer níveis adequados de conforto térmico no interior da edificação. No entanto, as modificações do clima regional que conformam o microclima local, identificado em cada sítio, devem ser observadas pelos projetistas, uma vez que não existem parâmetros legais de projeto para tal escala.

Importante destacar que a NBR 15.575, nas partes 1 e 2, aborda parâmetros de desempenho do edifício/projeto, em termos de temperaturas internas máximas e mínimas para a quantificação do nível de desempenho, que se aplicam à escala do microclima local. Ocorre que a referida norma aborda métodos de quantificação dos níveis de desempenho aplicáveis mais especificamente às etapas posteriores ao Estudo Preliminar de projeto ou ao edifício construído – uma vez que requer informações mais precisas em termos construtivos e de uso e ocupação da habitação.

Em resumo, para os Fatores Externos ao Projeto relativos ao clima e ao microclima, foram identificados os seguintes parâmetros legais com as devidas considerações, conforme explicitado no Quadro 2. 3

Quadro 2. 3 - Parâmetros identificados em termos de Fatores Externos ao Projeto CTP.

Parâmetro de referência	Documento Adotado	Considerações
Estratégias de projeto para as estações de inverno e verão – ZB's, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, e 8	NBR 15.220-3	Devem-se observar as estratégias de projeto com especial atenção as variações do clima na ZB4

2.2.2. Fatores Externos ao Projeto – Relação W/H e a forma dos Volumes Construídos

Primeiramente, deve-se destacar que a legislação específica consultada não disciplina diretamente a relação W/H ou a forma dos edifícios. No caso da relação W/H, os parâmetros que mais se aproximam são, por exemplo, os “afastamentos em relação ao limite do lote”, e os “afastamentos do vão de iluminação e ventilação” em relação ao lote vizinho, ou paredes cegas, ou paredes com outro vão de aeração ou iluminação.



Quando mencionados, estes parâmetros mínimos não ultrapassam a faixa de 0,50 a 3 metros de distância.

Tomando como exemplo os parâmetros presentes no CE de Brasília, os afastamentos fixados (Quadro 2. 4) não satisfazem os preceitos da relação W/H, determinando, por exemplo, o afastamento de 0,6m entre o vão exclusivo de aeração ou parede cega em edifícios de até três pavimentos. Considerando a relação W/H igual a 1 – mínima recomendada por Romero (2007) – para um edifício térreo de 4m (quatro metros) de altura, o afastamento mínimo necessário para o fluxo de ar recuperar parte do seu potencial inicial seria, aproximadamente, 4m (quatro metros), quase sete vezes maior de que o valor recomendado no CE-Brasília (Figura 2. 7).

A inadequação ou subdimensionamento dos afastamentos mínimos estabelecidos na legislação alerta o projetista para a importância da análise dos Fatores Externos ao Projeto, a fim de identificar possíveis interferências no fluxo de ar decorrentes da ocupação do entorno. Da mesma forma, devem ser levadas em conta preocupações quanto à adoção de diretrizes em relação aos parâmetros mais adequados que minimizem, por exemplo, a formação das esteiras de vento –

como é o caso daqueles indicados por Romero (2007), por meio da relação W/H.

Quadro 2. 4 - Afastamentos mínimos em relação às divisas de lotes e de paredes confrontantes a serem cumpridos por edificações de até 3 pavimentos. Fonte: adaptado do CE-DF.

Afastamento Mínimo	Parâmetro
1,50 m	Quando paralelos às divisas dos lotes
<1,50 m	Quando situado em plano perpendicular ou oblíquo em relação às divisas dos lotes
3,0m	Quando situados em paredes opostas e pertencentes a unidades imobiliárias distintas
1,50 m	Quando frontais a paredes cegas ou a vãos de aeração e iluminação de uma mesma unidade imobiliária
0,60 m	Em relação a outro vão exclusivamente de aeração ou de parede cega.

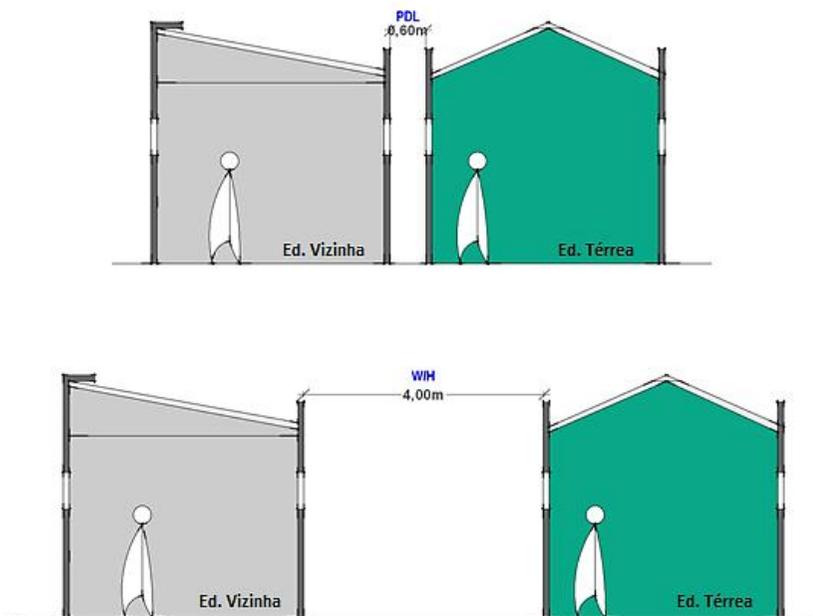


Figura 2. 7 - Comparação entre o afastamento lateral mínimo permitido pelo CE-DF, para vãos destinados exclusivamente à ventilação, em relação ao estabelecido com base na relação W/H=1.

Importante destacar que os CE's mencionam a necessidade do projetista consultar documentos legais complementares – Lei de Uso e Ocupação do Solo, por exemplo – para a determinação dos afastamentos/recuos a serem adotados no projeto conforme a altura do mesmo. Esses

parâmetros possuem relação com a forma final da edificação, principalmente em termos de elevação. Por exemplo, a forma piramidal comum às edificações em altura se deve à legislação que fixa o aumento dos recuos laterais conforme o aumento do número de pavimentos. O maior adensamento da “base” das edificações em altura pode ocasionar a formação de esteiras de vento nas regiões mais próximas do solo urbano.

No entanto, tendo em vista o recorte da presente tese, os parâmetros presentes nestes documentos não foram consultados – sendo adotados para o desenvolvimento do DVN os parâmetros mínimos apresentados pelos CE's e pela bibliografia levantada sobre a relação W/H. Em resumo, para este tópico, foi identificado o parâmetro legal apresentado no Quadro 2. 5.

Quadro 2. 5 - Parâmetros identificados em termos de Fatores Externos ao Projeto CTP.

Parâmetro de referência	Documento Adotado	Considerações
Afastamentos frontais e laterais	CE's	Devem ser complementados visando à relação W/H recomendada pela bibliografia



2.2.3. Fatores Externos ao Projeto – Barreiras de Vento

Outro fator que contribui para a formação e intensificação das esteiras de vento no nível mais próximo do solo é a presença de barreiras como, por exemplo, muros de divisas de lote. Nos CE's, a construção de muros é dispensada de aprovação por parte do órgão de fiscalização, com exceção dos muros de arrimo. Além disso, em determinados CE's não são definidos parâmetros legais em termos de limite de altura máxima, e afastamentos mínimos das aberturas de ventilação em relação aos muros de divisa de lote (Gráfico 2. 3 e Gráfico 2. 4).

Como visto no Capítulo 1, o estudo de Boutet (1987) abordou esses aspectos, apontando sua influência sobre a formação de esteiras de vento. A falta de parâmetros legais com relação aos muros pode prejudicar, principalmente, o potencial de aproveitamento da ventilação natural em edificações de até 3 pavimentos. Não foram identificados parâmetros legais relativos à influência da vegetação sobre os Fatores Externos ao Projeto.

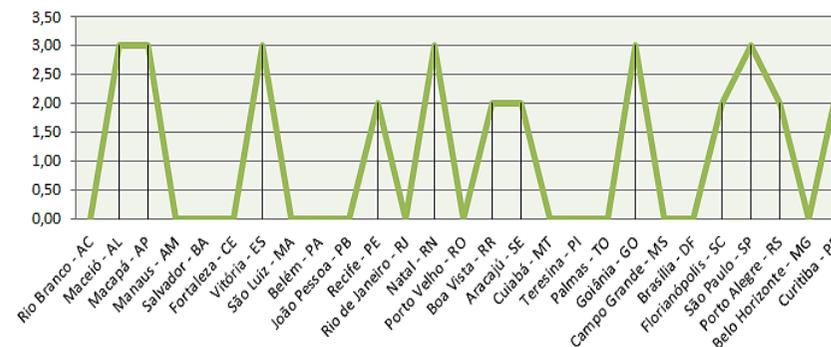


Gráfico 2. 3 – Alturas máximas de muros permitidas pelos CE's das capitais brasileiras. Sendo considerado "0" nos CE's que não fixando exigências claras.

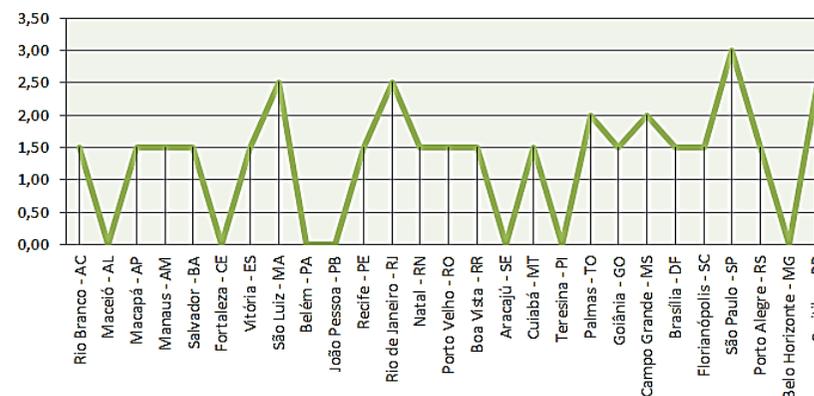


Gráfico 2. 4 – Afastamentos mínimos das aberturas de ventilação e iluminação em relação aos muros de divisa de lote fixados pelos CE's das capitais brasileiras. Sendo considerado "0" nos CE's que não fixando exigências claras



2.2.4. Fatores Internos ao Projeto – Posicionamento, Orientação e Forma do Projeto

Em se tratando dos Fatores Internos ao Projeto, os parâmetros legais relacionados ao posicionamento e forma do projeto são, basicamente, os mesmos apresentados no tópico sobre a relação W/H e densidade de ocupação dos volumes do entorno (2.2.2). Ou seja, parâmetros relacionados à forma, aos coeficientes de aproveitamento, aos afastamentos frontais e laterais, à altura máxima permitida, etc., são os únicos parâmetros relacionados ao desenvolvimento do projeto. Quanto ao posicionamento e a orientação do projeto, não foram identificados parâmetros legais. Somente a NBR 13.531 aborda esses como fatores a serem considerados pelo projetista em termos de favorecimento da iluminação e ventilação naturais.

2.2.5. Fatores Internos ao Projeto – Posicionamento, Dimensão e Distribuição das Aberturas

Os parâmetros legais para a determinação do tamanho das aberturas estão presentes nos CE's e na NBR

15.220-3. Primeiramente, buscou-se identificar se o clima é um dos critérios adotados pelos CE's para o dimensionamento das aberturas. Optou-se pela comparação dos códigos de edificações levando-se em consideração as diferentes Zonas Bioclimáticas envolvidas, segundo a NBR 15.220-3. Os parâmetros relativos ao tamanho das aberturas, constantes na NBR 15.575-4, também foram considerados para esta análise comparativa, em que pese apresentar limitações para ser aplicado na etapa do Estudo Preliminar.

Os parâmetros dos CE's consideram como critérios padrão o tipo de uso do ambiente e sua fração mínima de área de abertura em relação à área de piso. Assim, observam-se como padrões recorrentes as frações mínimas de abertura de 1/6 para dormitórios e salas, entre 1/8 e 1/6 para cozinhas, e entre 1/10 e 1/8 para banheiros (Gráfico 2. 5). Por outro lado, a NBR 15220-3 e a NBR 15575-4 seguem a Zona Bioclimática como critério padrão para a determinação do tamanho da abertura – expressa em percentual de abertura em relação à área de piso (Quadro 2. 6, Quadro 2. 7 e Quadro 2. 8).

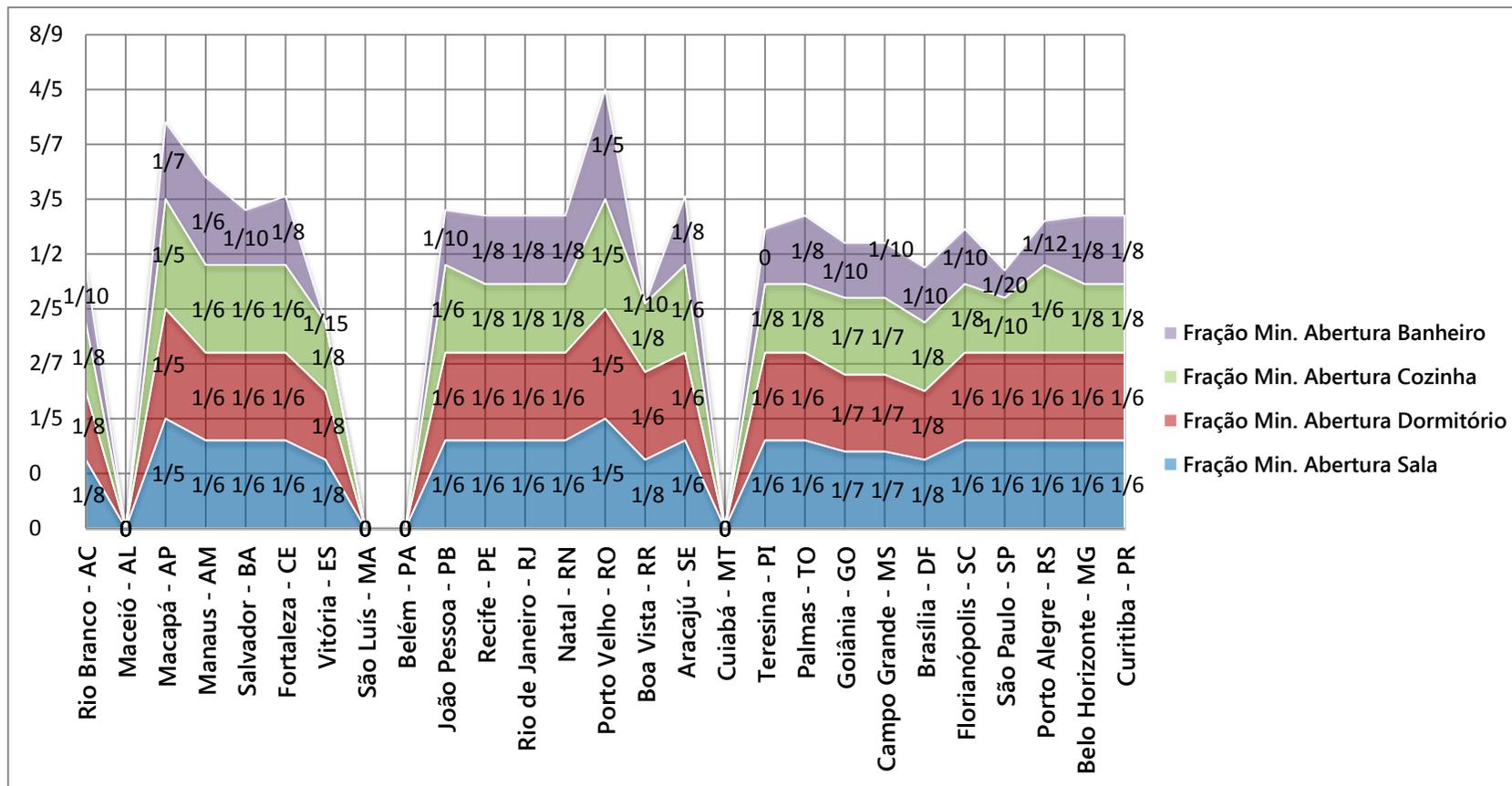


Gráfico 2. 5 - Fração mínima de abertura por ambiente estipulada pelos CE's nas capitais brasileiras. Sendo considerado "0" nos CE's que não fixam exigências claras



Quadro 2. 6 – Diretrizes de projeto propostas pela NBR 15220-3. Fonte: adaptado da NBR 15220-3.

Diretrizes de Projeto NBR 15220-3	Parâmetros de Referência		
	ZB 1 e ZB 2	ZB's 3, 4, 5 6	ZB 7 e ZB 8
Aberturas para ventilação	<i>Médias - permitir o sol durante o inverno</i>	<i>Médias - sombrear aberturas</i>	<i>Pequenas - sombrear abertura (ZB 7); Grandes sombrear aberturas (ZB 8)</i>
Estratégias de condicionamento térmico (verão)	<i>Ventilação Cruzada (ZB 2)</i>	<i>Ventilação Cruzada (ZB 3, 5); Ventilação seletiva – nos períodos quentes onde a temperatura interna seja superior à externa (ZB 4 e 6)</i>	<i>Ventilação Cruzada Permanente (ZB 8); ventilação seletiva – nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa (ZB 7)</i>
Estratégias de condicionamento térmico (inverno)	<i>Condicionamento passivo insuficiente</i>	-	-

Quadro 2. 7 – Especificação do tamanho da abertura. Fonte: adaptado da NBR 15220-3.

Aberturas para ventilação	A (% da área de piso)
Pequena	10% < A < 15%
Média	15% < A < 25%
Grande	A > 40%

Quadro 2. 8 – Determinação do tamanho da abertura para o desempenho mínimo da ventilação em habitações. Fonte: adaptado da NBR 15575-4.

Nível de Desempenho	Aberturas para Ventilação	
	Zonas 1 a 7 – Aberturas Médias	Zona 8 – Aberturas Grandes
Mínimo	A ≥ 7% da área de piso	A ≥ 12% da área de piso (Região Norte do Brasil) A ≥ 8% da área de piso (Região Nordeste do Brasil)



Observando o Gráfico 2. 5, identifica-se que frações de abertura idênticas são especificadas em cidades localizadas em Zonas Bioclimáticas distintas. Por exemplo, a fração de 1/6 ($\approx 16\%$) da área de piso é determinada para aberturas de dormitórios e salas nas cidades de Manaus-AM (ZB8), Curitiba-PR (ZB1), e Teresina-PI (ZB7). Por outro lado, a NBR 15220-3 sugere para essas cidades, respectivamente, aberturas “Grandes” ($>40\%$ da área de piso), “Médias” (entre 15% a 25% da área de piso) e “Pequenas” (entre 10% e 15% da área de piso). Em contra partida, a NBR 15575-4 determina, para o atendimento do desempenho mínimo, aberturas maiores ou iguais à 12% da área de piso para a cidade de Manaus-AM, maiores que 7% para a cidade de Curitiba-PR, e 8% da área de piso para a cidade de Teresina-PI.

O CE de Brasília especifica a fração mínima de 1/8 da área de piso para aberturas localizadas em dormitórios, salas e cozinhas. Considerando a área mínima de piso especificada em seu texto para dormitórios, o tamanho da abertura seria igual a $1,00\text{m}^2$. Tamanho semelhante é especificado pelos CE's em cidades com climas distintos como Rio de Janeiro-RJ, Teresina-PI, e Curitiba-PR (Gráfico 2. 6). Em determinados casos, não é possível identificar com clareza os parâmetros legais mínimos

para o dimensionamento das aberturas, a exemplo do que ocorre nas capitais Maceió-AL, Belém-PA e São Luis-MA – representadas com “0” a área mínima de ventilação dada sua impossibilidade de cálculo (Gráfico 2. 5 e Gráfico 2. 6).

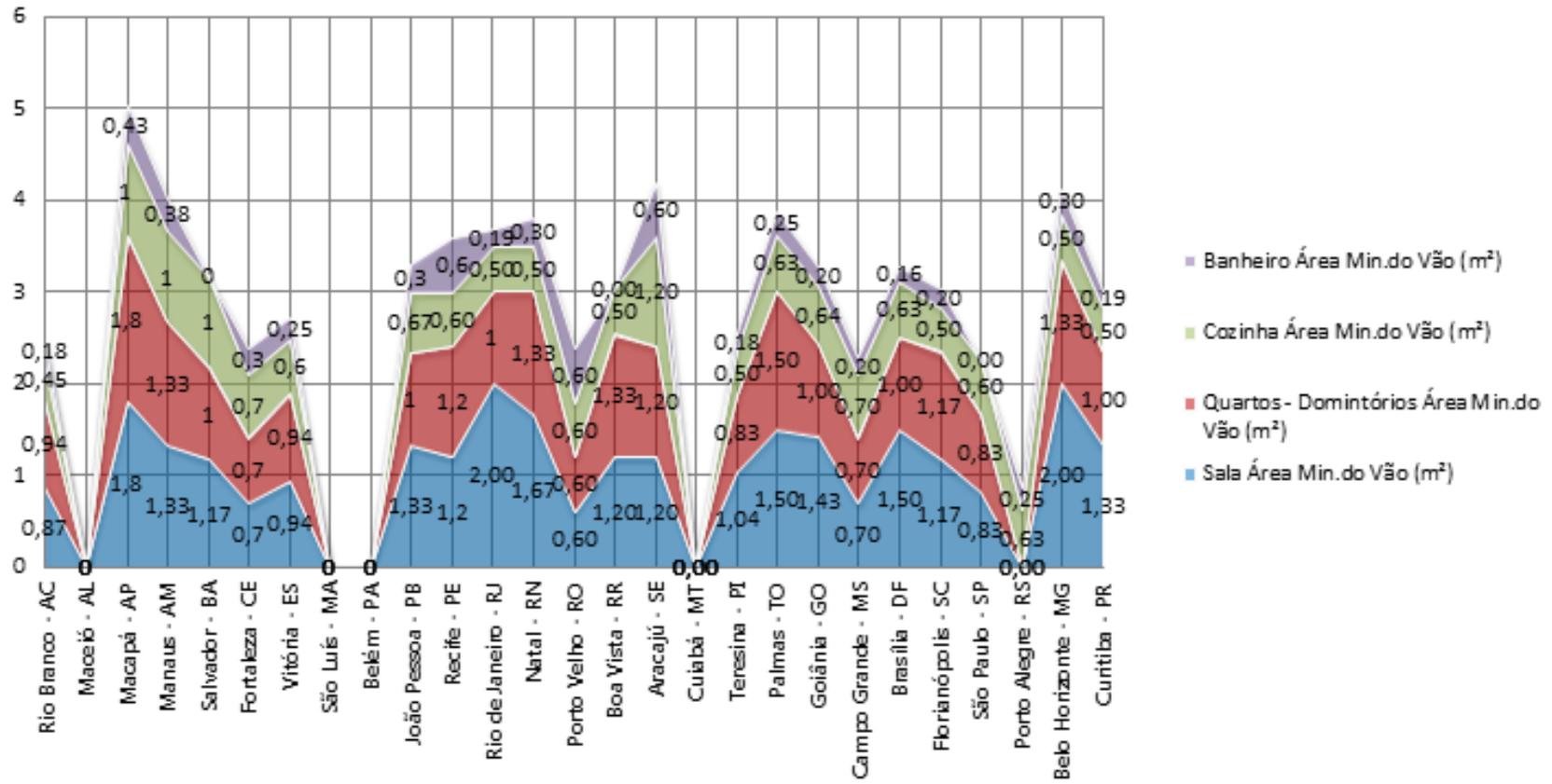


Gráfico 2. 6 - Área mínima do vão para ventilação estipulada pelos CE's das capitais brasileiras. Sendo considerado "0" nos CE's que não fixam exigências claras.



Com base nessas análises, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Existe discordância entre os critérios para a determinação da área de abertura nos CE's e nas NBR's;
- Existe discordância entre as NBR's acerca dos parâmetros de dimensionamento da abertura;
- Falta de clareza sobre quais são os parâmetros legais a serem seguidos pelo profissional de projeto, o que se deve ao fato de que os CE's exigem o cumprimento das NBR's - sendo que a NBR 15.220-3 não é de caráter obrigatório (versa sobre "recomendações" de projeto), e os parâmetros postos pela NBR 15.575-4 são aplicáveis aos casos onde "não houver exigências de ordem legal para o local de implantação da obra", ou seja, quando não houver Código de Edificações.

Além disso, existe aleatoriedade nos CE's quanto à definição das áreas de piso mínimas para os ambientes, o que torna mais difícil a identificação dos parâmetros legais para o tamanho das aberturas - enquanto Fator Interno de Projeto. Conforme se observa no Gráfico 2. 6, a padronização encontrada

nas frações de abertura se torna aleatória quando a área mínima do vão é calculada com base na área mínima de piso permitida para cada ambiente. Essa aleatoriedade é tão inadequada, sob o ponto de vista da eficiência da ventilação natural, quanto a padronização encontrada nas frações de abertura. Dada sua recente publicação e abordagem em termos de desempenho térmico do edifício em relação a sua Zona Bioclimática, os parâmetros de referência a serem identificados como Fator Interno ao Projeto, relativo ao tamanho da abertura do ambiente, são aqueles especificados pela NBR 15.575-4.

Com relação ao posicionamento e distribuição das aberturas, não foram identificados parâmetros de referencia legais. Assim, foi identificado o seguinte parâmetro legal (Quadro 2. 9).

Quadro 2. 9 - Parâmetro identificado em termos de Fatores Internos ao Projeto CTP.

Parâmetro de referência	Documento Adotado	Considerações
Determinação do tamanho da abertura	NBR 15.575-4	Devem ser observados tamanhos que alcancem o desempenho máximo da ventilação.



2.2.6. Fatores Internos ao Projeto – Divisões Internas e Profundidade da Planta

Como visto no Capítulo 1, a profundidade do ambiente está relacionada com a eficiência das trocas de ar proporcionadas pela ventilação natural. Assim, o aumento da profundidade deve observar o limite da zona passiva (6m em relação à superfície vertical com a abertura). De forma indireta, podemos considerar a influência dos parâmetros legais, em termos de volume mínimo, sobre a profundidade do ambiente.

Os CE's especificam áreas e pés-direitos mínimos para diversos tipos de ambientes na habitação. Esses parâmetros legais são importantes para estimar os volumes internos mínimos em função do seu uso – informação utilizada para o cálculo do número de renovações de ar. Em se tratando da utilização da ventilação natural para favorecer o CTP, dimensionar os ambientes de acordo com os volumes mínimos permitidos pela legislação pode ser uma estratégia interessante em casos, por exemplo, quando o fluxo do ar for reduzido. Ambientes com menor volume alcançam um número maior de renovações de ar por hora. O mesmo princípio também é válido para ambientes ventilados unilateralmente, nos casos em que a diferença de

temperatura interna em relação à temperatura externa é baixa. Nenhum parâmetro é estabelecido com relação às divisões internas para o favorecimento do escoamento do fluxo de ar nos ambientes. Em face do exposto, foi identificado o seguinte parâmetro de projeto, conforme indicado no Quadro 2. 10.

Quadro 2. 10 - Parâmetro identificado em termos de Fatores Internos ao Projeto CTP.

Parâmetro de referência	Documento Adotado	Considerações
Volume mínimo dos ambientes	CE-DF	Devem ser observados os volumes mínimos dos ambientes em função da “zona passiva”.

2.2.7. Fatores Internos ao Projeto – Elementos de Captação e Controle da Ventilação

Não foram identificados parâmetros específicos relacionados com elementos de captação ou com mecanismos de controle da ventilação natural para o conforto térmico. Na NBR 15.220-3, de forma indireta, o “sombreamento das aberturas” e a



“ventilação seletiva” podem ser caracterizados como parâmetros legais. A NBR 15.575-4 determina que para a Zona Bioclimática 4 as áreas de ventilação devem ser passíveis de fechamento durante períodos de inverno com a ocorrência de baixa temperatura.

2.3. Parâmetros Legais Presentes em Normas e Regulamentações Internacionais

Torna-se importante, na busca por parâmetros legais, uma breve revisão das principais normas e regulamentos de países da União Europeia e América do Norte, considerando o desenvolvimento e liderança desses países em termos de legislação relacionada com a Qualidade Interna do Ar e com o Conforto Térmico Passivo por meio da ventilação natural. Em virtude da diversidade de documentos específicos de cada país, o que se pretende, neste tópico, é a análise de documentos mais abrangentes, como as normas e regulamentações – a exemplo das diretivas da União Europeia, normas ASHRAE e o Código Residencial Internacional (IRC).

Antes da análise mais específica, destaca-se que, no âmbito internacional, é possível encontrar valores/parâmetros gerais aplicáveis a sistemas de ventilação mecânica que podem ser considerados para edificações residenciais ventiladas naturalmente - sob a mesma justificativa feita para a RE nº 09 da ANVISA. Ou seja, por satisfazerem cenários mais críticos em termos QIA, como é o caso de edificações comerciais, esses valores/parâmetros também satisfazem cenários menos críticos – como é o caso da habitação. Dessa forma, o relatório do CIB (2004) traz informações que podem ser aplicadas nesse contexto, as quais estão baseadas em dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) e da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) (Tabela 2. 4). Outra fonte importante é o relatório da ECA, (2003) que apresenta valores de referência quanto à concentração de fungos, bactérias e alérgenos em ambientes residenciais, e os seus limites de tempo máximos de exposição seguros à saúde humana (Tabela 2. 5).



Tabela 2. 4 – Valores de referência de alguns poluentes no ar em relação ao tempo de exposição máximo (CIB, 2004).

Poluente	Valor (mg/m ³)
Monóxido de Carbono (CO)	10 (8h)
	30 (1h)
	60 (30 min)
	100 (15 min)
Dióxido de Nitrogênio	0,2 (1h)
	0,04 (anual)
Material Particulado (PM ₁₀)	0,05 (anual)
	0,15 (24h)
Formaldeído	0,1 (30 min)
Fumaça de Tabaco	Não possui valor mínimo seguro a saúde humana

Tabela 2. 5 – Valores de referência de concentração de fungos, bactérias e alérgenos no ar em ambientes residenciais (CEC, 1993).

Categoria	Fungos (CFU/m ³)*	Bactérias (CFU/m ³)	Alérgeno Der p I (µg/g poeira)**
Muito Baixo	< 50	< 100	< 0,5
Intermediário	< 1.000	< 2.500	< 15
Muito Alto	>10.000	>10.000	> 20

* CFU/m³ - população mista por unidade de volume

** Alérgeno Der p I – presente nas fezes de ácaros.

2.3.1. Normas e Regulamentos da União Europeia

Com a consolidação da União Europeia (UE), um esforço significativo foi iniciado na busca da organização e homogeneização da legislação aplicável aos seus países membros. Em termos de desempenho do projeto/edifício não foi diferente. Assim, é importante deixar claro o papel de alguns documentos criados pela UE para a regularização do setor da construção. As diretivas são instrumentos legislativos da UE, obrigatórios para os estados membros, no que diz respeito aos objetivos em comum a serem alcançados. Por outro lado, deixam sob responsabilidade das autoridades locais a escolha da forma e o método a serem empregados para alcançar tais objetivos. De acordo com Wouters *et al.* (2006), em termos de ventilação, duas diretivas se destacam:

- *Diretiva do Produto Construído - DPC;*
- *Diretiva da Performance Energética dos Edifícios – DPEE.*

A importância da DPC recai sobre o fato de nela serem especificadas seis exigências fundamentais que forneceram a base para compatibilizar as normas europeias de construção. A



maioria dessas exigências está ligada à QIA, principalmente aquelas que versam sobre “higiene, saúde e meio ambiente” - tanto por meio da ventilação natural quanto pelo condicionamento artificial (WOUTERS *et al.*, 2006). Atualmente, o Regulamento (UE) N° 305/2011 substitui e complementa a diretiva original.

A DPEE, adotada no ano de 2002, define uma série de exigências relacionadas à eficiência energética dos edifícios, consolidando a obrigatoriedade da certificação do nível de desempenho energético para as novas edificações dos países membros. Fica a cargo de cada país membro a definição da metodologia para o cálculo dos níveis de eficiência do edifício. De acordo com Wouters *et al.* (2006), essa diretiva, apesar de tratar principalmente do consumo energético, também aborda aspectos diretamente relacionados às condições ambientais internas proporcionadas, dentre outros meios, pela ventilação natural. Pode-se observar tais aspectos, por exemplo, no artigo 4 da diretiva e em seu anexo, onde:

Art. 4 - [...] Estas exigências devem levar em consideração as condições ambientais internas gerais visando evitar possíveis efeitos negativos como a ventilação inadequada. [...]

Anexo

1 – A metodologia de cálculo do consumo energético dos edifícios integrará pelo menos os seguintes aspectos:

[...] f) Posição e orientação dos edifícios, incluindo condições climáticas exteriores; h) Ventilação Natural; i) Condições climáticas interiores, incluindo as de projeto.

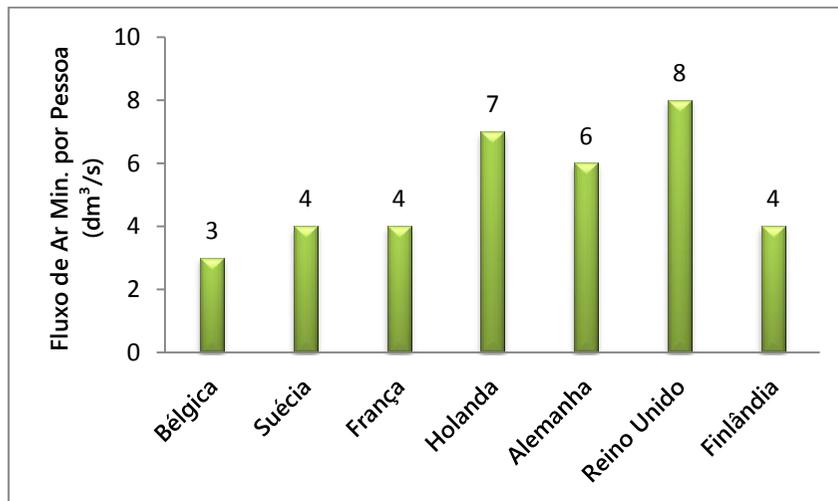
Diretiva 2002/91/EC (2003, p. 67 e 71)

Apesar da busca para homogeneizar o desempenho dos edifícios por meio de exigências gerais comuns aos países membros, a filosofia e os parâmetros relacionados à ventilação, presentes na legislação de cada país membro, são consideravelmente diferentes (Wouters *et al.*, 2001). O Gráfico 2.7 exemplifica a variação do fluxo de ar por pessoa exigida em normas de alguns países da União Europeia. Da mesma forma, encontram-se variações significativas nos valores referentes às necessidades de QIA. O documento produzido pelo comitê técnico dos países membros da EU para a elaboração de normas - CEN TC 156 - aponta uma variação de aproximadamente 400%



nas taxas de ventilação para remoção dos poluentes gerados pela ocupação do ambiente (CEN EN 13779, 2004).

Gráfico 2. 7 - Fluxo mínimo de ar por pessoa exigido em normas para habitações em países da UE. Fonte: adaptado de Wouters *et al.* (2001, p. 289).



Especificamente em relação à ventilação natural, Wouters *et al.* (2006) aponta de que forma as exigências de dimensionamento das aberturas e taxas de renovação do ar estão postas em alguns países da UE, visando ao fornecimento mínimo

natural de ar (Quadro 2. 11). O autor aponta, ainda, algumas tendências quanto à exigência/parâmetros legais nos países europeus, sendo elas:

- O dimensionamento das aberturas pode ser em função da área de piso ou ser um valor fixo de desempenho, dependendo do país;
- As unidades de medida vinculadas às exigências variam substancialmente, tornando difícil uma comparação direta em termos de QIA;
- Determinados países impõem área de abertura/janelas fixas (sem a possibilidade de abertura);
- Grandes diferenças quanto às necessidades de ventilação foram encontradas: para quartos de 7m², entre os diferentes países, existe um fator de variação de 3.7; enquanto que para quartos de 14m², o fator de variação é 6.8.



Quadro 2. 11 - Comparação entre os parâmetros de dimensionamento das aberturas em países europeus. Fonte: adaptado de Wouters *et al.* (2006, p. 293).

	Bélgica	França	Holanda	Reino Unido
Parâmetros de Dimensionamento da abertura	Fluxo de ar proporcional à área de piso $1 \text{ dm}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ área de piso para $\Delta P = 2 \text{ Pa}$	Valor fixo	Fluxo de ar proporcional à área de piso $1 \text{ dm}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ área de piso para $\Delta P = 2 \text{ Pa}$	Valor fixo
Vazão Natural para quartos $\leq 7 \text{ m}^2$	$7 \text{ dm}^3/\text{s}$ à 2 Pa	$45 \text{ m}^3/\text{h}$ à 20 Pa	$7 \text{ dm}^3/\text{s}$ à 1 Pa	8000 mm^2
Vazão Natural para quartos 14 m^2	$14 \text{ dm}^3/\text{s}$ à 2 Pa	$45 \text{ m}^3/\text{h}$ à 20 Pa	$14 \text{ dm}^3/\text{s}$ à 1 Pa	8000 mm^2

Importante destacar que a área de piso, indicada no quadro acima, é adotada como fator para a determinação de um fluxo de ar mínimo (desempenho), e o dimensionamento da abertura/ventilação deve obedecer esse desempenho mínimo (filosofia baseada na performance). O que diverge do quadro encontrado na legislação brasileira, em que não existe um fluxo de ar mínimo a ser cumprido em relação à área de piso –

somente uma fração de abertura que pode ou não proporcionar o fluxo adequado de ar (filosofia baseada na descrição).

Dentre os países membros da EU, a legislação do Reino Unido se destaca em termos de facilidade de acesso, organização e compreensão das exigências legais, avanços quanto a aspectos de sustentabilidade das edificações, entre outros. Primeiramente, o Reino Unido disponibiliza um vasto conteúdo, que pode auxiliar o desenvolvimento do projeto, em um portal (*Planning Portal*) disponível na rede mundial de computadores. Nele são especificadas, por exemplo, quatro regiões com exigências distintas em termos de propriedades físicas dos materiais – considerando as condições climáticas e visando ao melhor desempenho energético do edifício (Figura 2. 8). Além disso, possui uma ferramenta interativa, onde o projetista pode selecionar, em uma maquete computacional, cada elemento da edificação – sendo, com isso, disponibilizadas todas as informações legais para aquele elemento, ou o link onde tal informação está disponível. A Figura 2. 9 exemplifica essa ferramenta, mostrando o elemento “turbinas de vento” e a forma como a informação é disponibilizada.

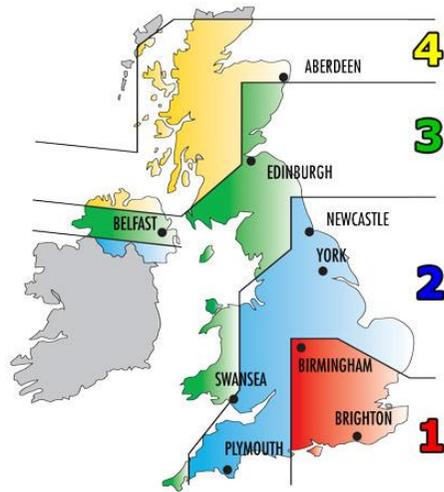


Figura 2. 8 – Subdivisão das regiões do Reino Unido com exigências específicas de projeto – característica dos materiais das vedações verticais e horizontais. Fonte: disponível em: (<http://www.planningportal.gov.uk/buildingregulations/>). Acesso em 03/03/2014.



Figura 2. 9 – Ferramenta interativa (modelo 3D) com a qual se pode encontrar informações legais sobre cada elemento da edificação/projeto. Fonte: disponível em: (<http://www.planningportal.gov.uk/permission/>). Acesso em 03/03/2014

2.3.2. Normas e Regulamentos Norte Americanos

Na América do Norte, Canadá e Estados Unidos são os países com maior destaque em termos de legislação e estudos que abordam a preocupação, principalmente, com a qualidade do ar (interna e externa ao edifício). Por exemplo, Zuraimi et al (2015) desenvolveram um estudo estimando que a aplicação correta dos parâmetros de qualidade interna do ar em habitações fixados pelo Código de Edificações da cidade de Toronto, no Canadá, representa um potencial de redução de 53%



da taxa anual de mortalidade e uma economia de US\$ 2.3 bilhões/ano, considerando os efeitos de exposição ao material particulado $PM_{2.5}$ ⁸. Ainda segundo os autores, o Código de Edificações Nacional (NBC), os Códigos de Edificações das provinciais, aliado a norma R-2000 (que versa sobre a eficiência energética e a QIA em edificações) são a base de consulta para os projetistas e demais atores envolvidos na busca de edificações saudáveis.

Com relação aos Estados Unidos, desde o início do século XX, o seu sistema de regulamentos de projeto e construção de edifícios foi sendo substituído por códigos de edificação padronizados – denominados de código modelo de edificação. Em 1994, os três organismos responsáveis pelo desenvolvimento desses códigos modelo se reuniram para formar o Conselho Internacional de Códigos (ICC), unificando os códigos desenvolvidos até então em um único documento denominado de Código Internacional do Edifício (IBC). Em 2000, após revisões e adequações, o ICC passou a publicar uma série de códigos

⁸ O Material Particulado (composto por partículas finas $PM_{2.5}$) é um poluente do ar prejudicial a saúde das pessoas quando os níveis no ar são elevados. As partículas na gama de tamanhos $PM_{2.5}$ (25.000 vezes menor que uma polegada) são capazes de viajar profundamente no sistema respiratório, que atinge os pulmões. (Departamento de Saúde do EUA, 2011 – disponível em: http://www.health.ny.gov/environmental/indoors/air/pm2_5.htm).

internacionais específicos - dentre eles o Código Internacional Residencial (IRC), o qual disciplina a construção de habitações unifamiliares, bifamiliares, e condomínios habitacionais no país (TROMBLY, 2006; WRIGHT, 2010; IRC, 2012).

O IRC possui como objetivo o estabelecimento de disposições para a adequação de residências sob o ponto de vista da segurança, saúde pública e bem-estar. Aborda aspectos relacionados ao sistema estrutural, isolamento térmico, sistemas mecânicos, entre outros. Mesmo reunindo os aspectos gerais, comumente necessários para a construção do edifício, o IRC também faz menção a outros documentos específicos referentes a tipos particulares de estruturas, projetos, sistemas e métodos de construção. Grosso modo, a estrutura e os objetivos do IRC se assemelham aos códigos de edificações brasileiros (como exemplificado abaixo). No entanto, destaca-se por ser mais uniforme (reunir informações sem a necessidade do projetista consultar diversos outros documentos), mais abrangente em termos de aspectos do projeto a serem observados pelo projetista, e por ser válido para todo o território dos EUA.



O objetivo deste código é estabelecer exigências mínimas para assegurar a segurança pública, saúde e bem estar geral, por meio da [...] acessibilidade, estabilidade, higiene, iluminação e ventilação, conservação de energia no ambiente construído [...]

IRC (2012, cap. 1, p.01)

[...] estabelecer padrões de qualidade dos espaços edificados que satisfaçam as condições mínimas de segurança, conforto, higiene, saúde e acessibilidade aos usuários e demais cidadãos [...]

Lei nº 2.105 de outubro de 1998 - COE-DF (p.01)

Logo em sua parte inicial, o IRC apresenta considerações quanto ao clima que devem ser observadas pelo projetista para cada local/região. Por exemplo, em termos de fatores climáticos relacionados aos ventos, o IRC apresenta um mapa de zonas de intemperes, a partir do qual devem ser adotadas diretrizes de projeto para a amenização dos seus efeitos; e um mapa de velocidades do vento no território norte-americano, no qual devem ser observados os dados para compor o desenvolvimento do projeto. Além disso, o IRC apresenta um mapa dos locais/regiões específicas, e um mapa de zonas de vento (com três zonas específicas e uma região especial,

localizada principalmente nas áreas costeiras Figura 2. 10). A ação dos ventos expressa nesses mapas deve ser considerada no projeto para o dimensionamento da estrutura do edifício (Figura 2. 11).

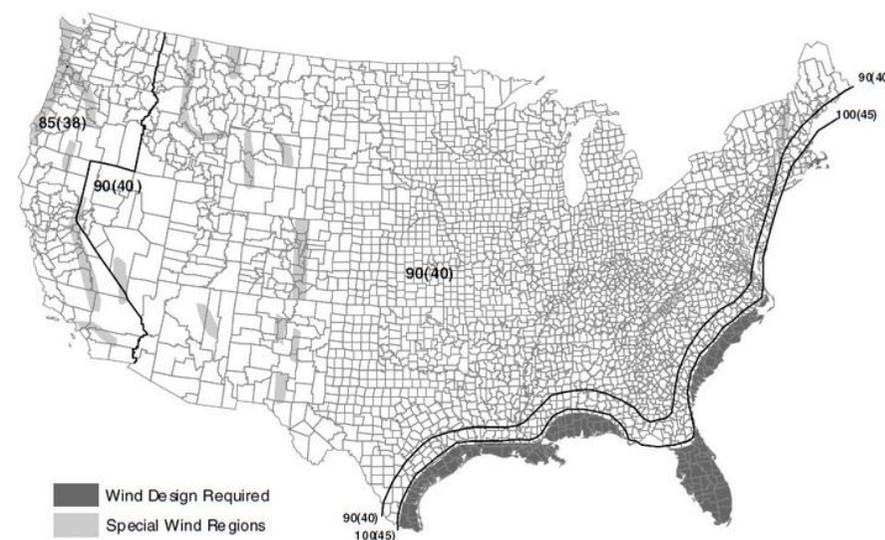


Figura 2. 10 - Mapa de áreas com exigências especiais de projeto em relação às características do vento. Fonte: IRC (2012, p. 36).

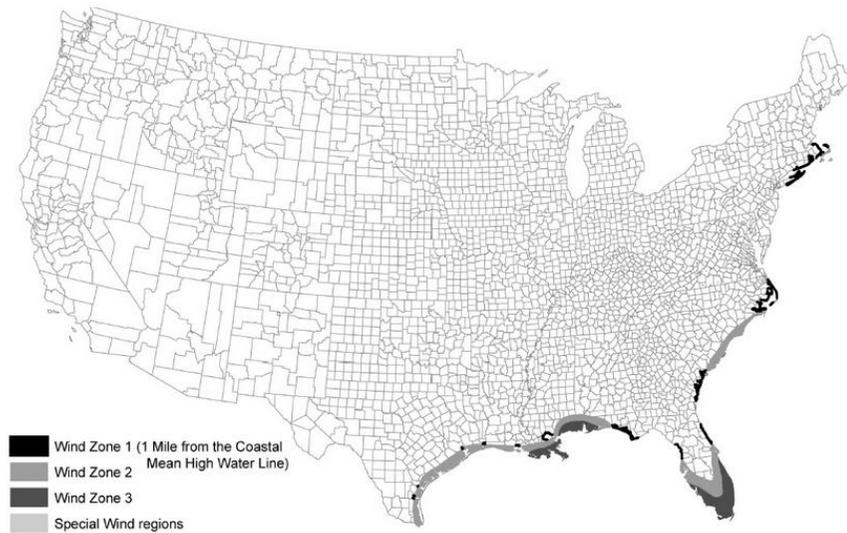


Figura 2. 11 - Mapa das diferentes Zonas de Vento. Fonte: IRC (2012, p. 35).

Por meio desses mapas, também podem ser coletadas informações importantes para a determinação de diretrizes de projeto. Por exemplo, a possibilidade de utilização de sistemas de aproveitamento da energia eólica no edifício e/ou determinação de sistemas de coleta ou obstrução do vento (conforme a necessidade do projeto).

Ao longo do seu texto, o IRC apresenta exigências diversas. No Quadro 2. 12 são indicadas as exigências que mais

se destacam em termos de parâmetros de projeto para a ventilação natural. É importante ressaltar que não se deve comparar os valores dispostos no IRC com valores identificados nas normas e códigos de edificações brasileiros, visto que, por exemplo, as realidades climáticas e as necessidades de conforto térmico são diferentes. Deve-se considerar, entretanto, os pontos positivos da filosofia que rege o IRC, sendo possível identificar dois pontos interessantes: a condensação das exigências (ou maior parte delas) em um único documento, e a preocupação em considerar aspectos climáticos em favor do desempenho do edifício.

Somados aos parâmetros constantes no IRC, também se destacam os documentos desenvolvidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA). A agência é responsável por iniciativas específicas quanto à Qualidade do Ar, tanto no exterior (meio ambiente) quanto no interior dos edifícios. As Normas Nacionais de Qualidade Ambiental do Ar (NAAQS), a Lei do Ar Limpo (CAA), a Lei da Independência Energética e Segurança (EISA), os programas de certificação da QIA (*Indoor AirPlus Program*), além de guias para projetos que visam a QIA em residências, escolas, escritórios, etc., são exemplos de



legislação complementar ao IRC que podem subsidiar o desenvolvimento do projeto e favorecer níveis adequados de QIA.

Quadro 2. 12 - Parâmetros gerais de projeto relacionados com a ventilação natural identificados na IRC. Fonte: adaptada da IRC (2012).

Item	Parâmetro
Entorno	Considerações quanto à influência da topografia, relevo e implantação do projeto em relação à incidência dos ventos no local
	Forte preocupação com a influência do radônio na QIA. Mapas dos locais/regiões que devem adotar medidas de projeto para minimizar os efeitos do radônio (estruturas especiais).
Habitação	Todos os ambientes habitáveis devem possuir acesso à iluminação natural (min. 8% da área de piso) e ventilação natural por aberturas operáveis (min. 4% da área de piso).
	Não somente as janelas são consideradas como aberturas para a ventilação natural, também permite-se que portas e outros elementos justificáveis em projeto sejam adotados.
	Os banheiros devem possibilitar o acesso à luz natural, e providos de aberturas para a ventilação com no mínimo 0,3m ² (sendo metade desta área operável)
	Considerações quanto à possibilidade (e em certos casos necessidade) de integração da ventilação natural e artificial
	Abertura para a aplicação de novas tecnologias que visam o melhor desempenho do edifício.

Por fim, são significativas as contribuições da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-condicionado (ASHRAE), em termos de pesquisa, desenvolvimento e normatização da ventilação no edifício, inclusive a ventilação natural e Qualidade Interna do Ar. No ano de 2003, a ASHRAE foi responsável pela publicação da primeira e única norma sobre QIA reconhecida para residências nos Estados Unidos, ASHRAE 62.2 - *Ventilação e Qualidade Interna do Ar Aceitáveis em Edificações Residenciais de Baixa Altura* (SHERMAN, 2004). Essa norma trata das exigências necessárias para assegurar a qualidade interna mínima do ar em habitações unifamiliares e pequenas habitações multi-familiares. Assim como as NBR's, as normas técnicas da ASHRAE não possuem força de lei - sendo adotadas pelos profissionais como forma de balizar o exercício da profissão, ou seja, com parte de sua responsabilidade enquanto profissional.

A ASHREA 62.2 é baseada no desempenho do edifício, não se aprofundando na descrição dos aspectos relacionados à ventilação - mas sim, estipula valores quanto ao fluxo de ar mínimo que deve ser atendido para a retirada dos poluentes no interior dos ambientes, considerando a existência de diferentes tipos de residências, climas, e tipos de construção.



Segundo Sherman (2004 b), para conciliar essas diferenças, a norma foi desenvolvida de forma a possibilitar certa flexibilidade, a exemplo do que ocorre para o atendimento das taxas de ventilação, que podem ser tanto por meios mecânicos quanto por meios naturais – ou de forma mista.

O fluxo de ar exigido para o ambiente, em função do seu tamanho, pode ser atendido pela ventilação natural desde que se comprove a inexistência de risco da utilização do ar externo para a saúde humana. Para isso, é necessário que haja uma análise local do entorno, que inclui: a verificação da proximidade do projeto a fontes geradoras de poluentes (fábricas, vias expressas, etc.), a segurança e a operabilidade do sistema de ventilação (SHERMAN, 2004 b). No entanto, a ASHREA 62.2 se restringe a tratar da qualidade interna do ar pelo ponto de vista do controle do nível de poluentes na edificação, não considera, portanto, o conforto térmico - que é abordado pela ASHRAE 55 apresentada no Capítulo 1.

Após a identificação dos parâmetros legais que subsidiarão o desenvolvimento da ferramenta proposta, parte-se para o Capítulo 3, em que são abordados os principais modelos e ferramentas atualmente utilizados para a predição e análise da ventilação natural. O capítulo também caracteriza o modelo

gráfico, tipo de modelo em que se será baseado o desenvolvimento da ferramenta proposta.

CAPÍTULO 3

Modelos e Ferramentas de Predição da Ventilação Natural no Desenvolvimento do Projeto

Resumo do Capítulo

O presente capítulo apresenta a revisão dos principais modelos e ferramentas utilizados na análise e predição da ventilação natural, em termos de seu potencial e desempenho para favorecer a QIA e o CTP no projeto/edifício. Após a apresentação e caracterização dos modelos e suas respectivas ferramentas de aplicação, especial foco é dado na identificação de seus pontos positivos e negativos quanto à possibilidade de aplicação durante o desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto – principalmente no que diz respeito a custos, facilidade de acesso e utilização pelo projetista, e precisão dos resultados a que se propõem fornecer. A relevância e larga aplicação técnica na predição do comportamento do fluxo de ar em edifícios, descrita em revisões publicadas em trabalhos científicos sobre o tema, foram os critérios utilizados para a escolha dos seguintes modelos: analítico e empírico, multizona e de zona única, em escala, e modelos computacionais de dinâmica dos fluidos (CFD) – todos abordados neste capítulo. Além disso, são apresentadas as características do modelo gráfico e as ferramentas baseadas nesse modelo, exemplificando algumas aplicações no campo da arquitetura. Por fim, foram destacados os aspectos que justificam o desenvolvimento da ferramenta proposta, no sentido de preencher algumas das lacunas deixadas pelas atuais ferramentas disponíveis para a análise e predição da ventilação natural no Estudo Preliminar de Projeto.



OBJETIVOS DO CAPÍTULO 3

O objetivo geral deste capítulo é abordar os principais modelos, e suas respectivas ferramentas, atualmente utilizados para a análise e predição da ventilação natural em projeto – com foco nos aspectos da QIA e CTP e na aplicação durante o Estudo Preliminar de Projeto – visando à identificação de lacunas que possam ser preenchidas pelo desenvolvimento de uma nova ferramenta baseado no modelo gráfico. São objetivos específicos desse capítulo:

1. Caracterização e análise dos principais modelos e ferramentas utilizados para a análise e predição da ventilação natural, bem como do modelo gráfico;
2. Identificação dos pontos positivos e negativos dos modelos e ferramentas caracterizados e analisados – sob o ponto de vista do auxílio ao projetista durante o Estudo Preliminar para o favorecimento da QIA e CTP
3. Identificação dos aspectos a serem priorizados no desenvolvimento da ferramenta proposta (baseada no modelo gráfico), visando preencher algumas das lacunas deixadas pelos

modelos e ferramentas atualmente utilizados para a análise e predição da ventilação natural – no auxílio ao projetista durante o Estudo Preliminar no favorecimento da QIA.

O presente capítulo segue a estrutura apresentada na Figura 3. 1.

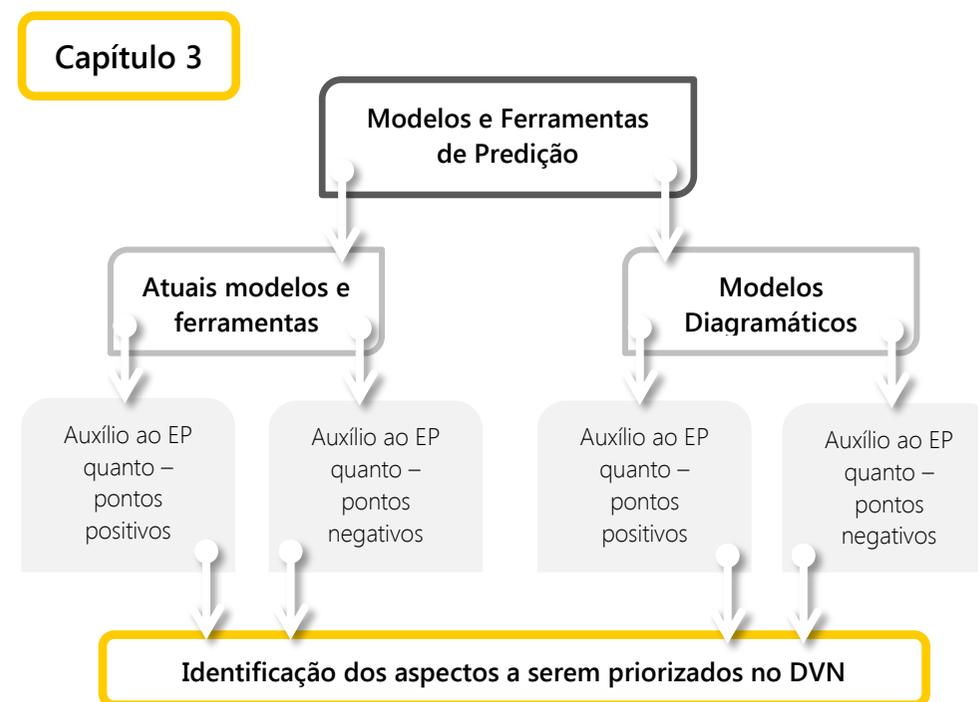


Figura 3. 1– Estrutura que compõe o Capítulo 3



INTRODUÇÃO

A partir da revisão da literatura, é possível identificar uma diversidade de termos utilizados para a definição de técnicas de análise e predição do comportamento do fluxo do ar no espaço urbano ou no interior do edifício (ex.: AYNSLEY *et al.*, 1977; AWBI, 1991; SANTAMOURIS e DASCALAKI, 2002; ETHERIDGE e SANDBERG, 2007; ALLARD, 2002; GHIAUS e ALLARD, 2005; AXLEY, 2006; HEISELBERG *et al.*, 1998; CHEN, 2009), tais como: “ferramenta de desenho”, “ferramentas de análise”, “ferramentas de predição”, “modelos de predição”, “método de análise”, entre outros. Identifica-se, ainda, a utilização dos termos “método”, “modelo”, e “ferramenta”, para se dirigir uma mesma técnica de análise da ventilação natural – fato que torna confusa uma conceituação definitiva e única para esses termos.

Dessa forma, é importante tornar clara a conceituação adotada nesta tese para definir o que é “método”, “modelo”, e “ferramenta”, para a análise e predição do comportamento do fluxo de ar da ventilação natural. De início, conceitua-se o método como um processo de análise (um modo de fazer) empregado para se obter um resultado ou conjunto de

resultados relacionados ao comportamento do fluxo de ar em um determinado caso. Já o modelo pode ser conceituado como a técnica utilizada durante uma determinada parte do método – visando a obtenção de um determinado resultado ou conjunto de resultados. Assim, por exemplo, um método para a predição da ventilação natural em um edifício pode utilizar um ou mais modelos de predição, a fim de complementar ou validar um determinado resultado parcial ou final.

Com relação ao conceito de ferramenta, considera-se, na presente tese, que cada modelo possui ferramentas de aplicação específicas. Por exemplo, os instrumentos de medição utilizados em modelos experimentais em escala ou os programas computacionais utilizados nos modelos CFD são ferramentas de aplicação específicas – ou seja, variam conforme o tipo de modelo adotado. Portanto, uma ordem de grandeza entre os conceitos de Método – Modelo – Ferramenta é estabelecida neste capítulo (Figura 3. 2). Considerando a conceituação apresentada, destaca-se que a abordagem será delimitada aos principais modelos (e suas ferramentas de aplicação), tendo em vista os objetivos da presente tese.

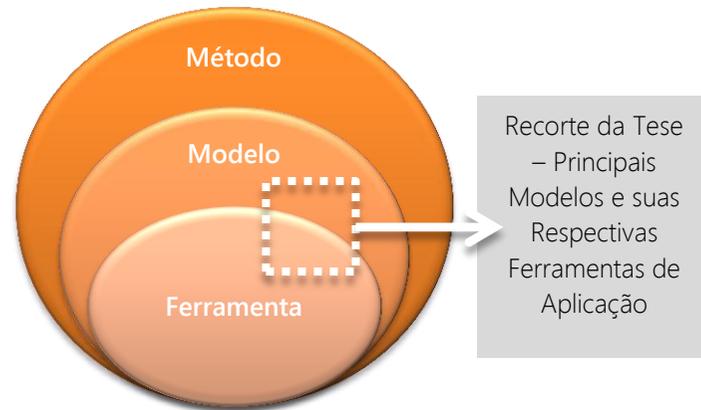


Figura 3. 2 - Hierarquia dos conceitos de Método – Modelo – Ferramenta, e o recorte definido para a presente tese.

Assim, tomando como base importantes revisões sobre os modelos e ferramentas aplicadas na predição do comportamento do fluxo do ar em edifícios (ex.: AYNSLEY *et al.*, 1977; AWBI, 1991; SANTAMOURIS e DASCALAKI, 2002; ETHERIDGE e SANDBERG, 2007; HEISELBERG, *et al.*, 1998; AXLEY, 2006; CHEN, 2009), serão abordados os seguintes modelos: analítico e empírico, multizona e de zona única, modelo em escala, e modelo computacional de dinâmica dos fluidos (CFD).

Primeiramente, pode ser feita uma organização geral quanto a aplicação desses modelos, tomando como base os trabalhos de Heiselberg *et al.* (1998) e Axley (2006 e 2007), nas seguintes classes:

- **Modelos Macroscópicos** (simplificados): baseados na representação física de um espaço construído em um conjunto de volumes de controle, cujo comportamento pode ser descrito por equações algébricas ou equações diferenciais ordinárias;
- **Modelos Microscópicos** (detalhados): baseados em soluções numéricas aproximadas de um sistema de equações diferenciais parciais, em que o domínio físico do sistema é subdividido em uma malha relativamente fina.

Dessa forma, os modelos analítico e empírico, multizona e de zona única, são classificados como modelos Macroscópicos – possuindo utilização mais simples, rápida e com menor custo de aplicação; além disso, possuem foco de análise mais amplo em termos de estimativa de resultados. Já os modelos em escala (reduzida ou real) e CFD são classificados como Microscópicos, com foco de análise mais detalhado e preciso –



sendo o grau de detalhamento e precisão refletido no custo e no tempo envolvidos na sua aplicação. (Figura 3. 3).

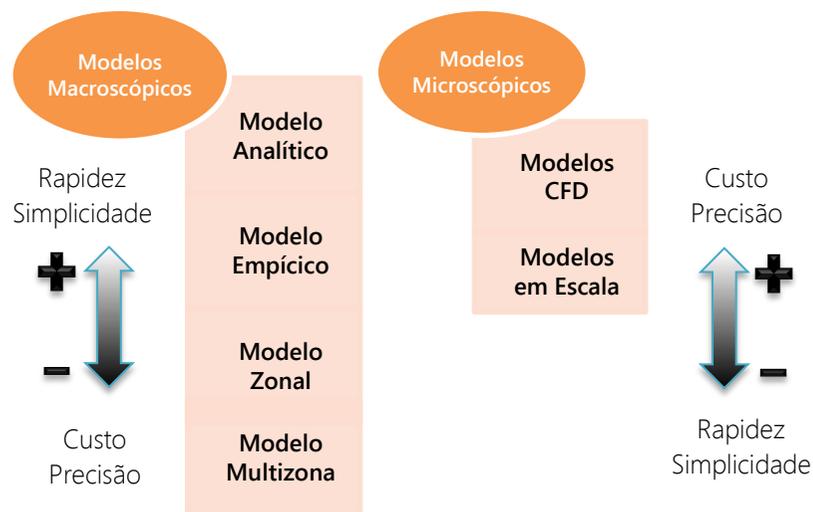


Figura 3. 3 - Organização dos modelos de análise e predição em termos de aplicação.

A partir dessa organização, Heiselberg *et al.* (1998) abordam sobre a aplicação mais adequada de cada modelo (Macroscópico e Microscópico) para a quantificação das necessidades de ventilação – em relação às etapas do processo

de projeto. Segundo os autores, durante as etapas iniciais do projeto, quando a forma do edifício e as necessidades de “qualidade ambiental interna estão grosseiramente traçadas”, diretrizes e soluções para o sistema de ventilação a ser utilizado são baseadas na experiência do profissional e na correta aplicação de modelos simples de análise – modelos Macroscópicos. Por outro lado, quando o projeto tratar de espaços críticos ou não convencionais, modelos de análise e predição mais detalhados (modelos Microscópicos) também podem ser utilizados nas primeiras etapas de projeto.

No entanto – segundo os autores mencionados – a aplicação dos modelos Microscópicos é mais viável em etapas adiantadas do projeto, quando se possui informações consolidadas e detalhadas. Por exemplo, um custo considerável é envolvido na aplicação de modelo CFD conforme se aumenta o número de análises/simulações, em decorrência de alterações no projeto. Nas etapas iniciais, essas alterações decorrem de motivos diversos, como o desenvolvimento de estudos complementares posteriores (estrutural, hidráulico, segurança contra incêndio, etc.), mudança de *layout* interno, entre outros.

Em termos de QIA, a separação de responsabilidades entre os profissionais que participam do processo, do desenho à



construção do edifício, pode tornar ainda mais complexa uma análise detalhada das etapas iniciais do projeto por meio de modelos Microscópicos. Como aborda Spengler *et al.* (2001), essa separação no processo de projeto e construção do edifício representa um dos principais problemas para a QIA – uma vez que dificulta a formulação de um cenário futuro a ser trabalhado desde o início do projeto. Assim, da forma como a maior parte dos projetos é desenvolvida, não existe a interação entre os grupos de desenho e construção – cada um possui responsabilidades distintas, contratos diferenciados, e participam de apenas parte do projeto. Dessa forma, diversas alterações surgem até a finalização da construção, motivadas por circunstâncias como inadequação da planta, especificações incorretas, redução de custos, cumprimento de prazos, etc.

Heiselberg *et al.* (1998) apresenta um resumo das etapas do processo de projeto de grandes edifícios em relação à aplicação dos modelos de análise e à predição do fluxo do ar – em sistemas de ventilação mecânicos de Aquecimento, Ventilação e/ou Ar Condicionado (AVAC) (Figura 3. 4 e Quadro 3. 1). Nas informações expostas, evidencia-se que à medida que se aumenta o grau de informação a respeito do projeto, cresce a necessidade de aplicação de modelos mais detalhados de

previsão e análise do sistema de ventilação. Os autores também fazem menção aos “modelos de eficiência da ventilação”, os quais avaliam o desempenho do sistema escolhido especificamente em relação ao seu consumo energético – consistindo basicamente em modelos CFD de aplicação restrita às etapas mais adiantadas do projeto.

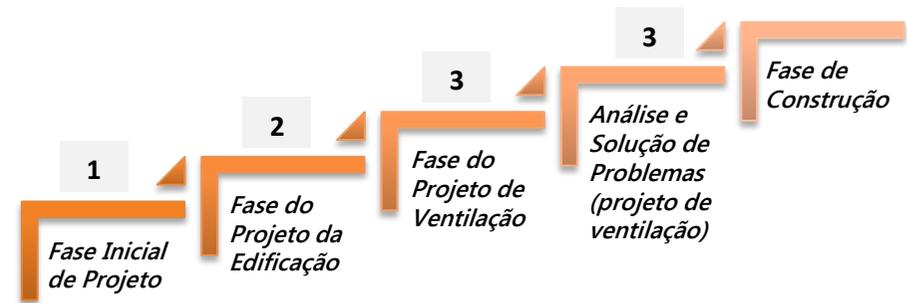


Figura 3. 4 - Etapas do processo de projeto em relação ao sistema de ventilação apresentadas por Heiselberg *et al.* (1998)



Quadro 3. 1 - Relação entre o processo de projeto e os modelos de predição e análise da ventilação. Fonte: adaptado de Heiselberg *et al.* (1998, p. 23)

	(1) Projeto Esquemático	(2) Projeto Básico	(3) Projeto Detalhado
Tema a ser Planejado	<ul style="list-style-type: none"> - Formas do edifício e materiais da envoltória; - Qualidade do ambiente interno; - Noções do sistema de AVAC 	<ul style="list-style-type: none"> - Refinamento do layout e envoltória do edifício; - Decisões de fornecimento, volume e temperatura do ar; - Esboço da operação do edifício e do sistema de AVAC. 	<ul style="list-style-type: none"> - Decisão final do layout e materiais da envoltória do edifício, etc.; - Especificação do sistema de AVAC; - Sistemas de operação e controle do edifício e AVAC.
Assunto a ser conhecido	<ul style="list-style-type: none"> - Estimativa aproximada das cargas de aquecimento e resfriamento; - Predição aproximada do fluxo de ar e distribuição das temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> - Predição cuidadosa das cargas de aquecimento e resfriamento, associadas ao consumo de energia e custo de operação; - Distribuição do fluxo de ar e temperaturas; - Índice de conforto térmico (ex.: PMV); - Regiões de desconforto causadas por radiação solar, correntes de ar frio, etc.; - Situações de pré-aquecimento e pré-resfriamento. 	
Ferramentas de Projeto	<ul style="list-style-type: none"> - Experiência e dados de medições em edifícios similares existentes; - Modelos Macroscópicos simples para uma primeira estimativa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modelos Macroscópicos avançados ou possíveis Modelos Microscópicos para uma segunda estimativa. - Modelo de eficiência da ventilação (avaliação da performance da ventilação) 	<ul style="list-style-type: none"> - Modelos Microscópicos para a validação do desenho e situações problema (modelos CFD ou modelos em escala).

Analisando o processo de projeto apresentado acima, em seu sentido inverso, pode-se concluir que quanto mais próximo do início do desenvolvimento do projeto, menor é a disponibilidade de informações específicas e detalhadas, e mais genéricas devem ser as análises. Em termos de QIA e CTP, nessa fase do projeto (caracterizada na presente tese como sendo o recorte entre a etapa de Levantamento e Estudo Preliminar) busca-se a identificação de problemas e necessidades gerais, além do estabelecimento de soluções ou diretrizes que irão nortear as demais etapas do projeto quanto ao sistema de ventilação natural. Dessa forma, nas etapas iniciais, os modelos Macroscópicos são os mais adequados para auxiliar o projetista nas análises preliminares.

Portanto, sob um ponto de vista geral, pode-se perceber que a relação entre os modelos Macroscópicos e Microscópicos não se configura como hierárquica, mas sim em uma relação de interdependência. Em outras palavras, o adequado dimensionamento e a eficiência do sistema de ventilação determinado para o projeto (seja natural, artificial ou híbrido) depende tanto da aplicação inicial dos modelos Macroscópicos quanto da aplicação posterior dos modelos Microscópicos.



Fica claro, em face do exposto, que a ferramenta proposta pela presente tese deve ser baseada em modelos Macroscópicos, tendo em vista sua aplicação específica durante as etapas iniciais do projeto. No entanto, para sua elaboração, é fundamental o auxílio de modelos Microscópicos – por meio dos quais serão quantificadas cada uma das variáveis que formarão os resultados possíveis de serem obtidos por meio da combinação dos diagramas (referentes aos Fatores Internos e Externos ao Projeto, e Parâmetros Legais, identificados nos capítulos 1 e 2). Dessa forma, é apresentada, a seguir, a caracterização e análise dos principais modelos Macroscópicos e Microscópicos atualmente utilizados na predição e análise da ventilação natural – tendo em vista a identificação dos pontos positivos e negativos que serão importantes para o desenvolvimento do Diagrama de Ventilação Natural.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS MACROSCÓPICOS

3.1.1. Modelos Analíticos e Empíricos

Segundo Chen (2009), os modelos analíticos aplicados à predição do comportamento do fluxo de ar em edifícios se originam das equações fundamentais da dinâmica dos fluidos e transferência de calor, relacionadas com conservação de massa, momento, e energia – baseando-se, geralmente, nas equações de *Bernoulli*⁹. Esse tipo de modelo pode ser considerado como o “mais antigo método científico” utilizado para a predição da performance da ventilação, no entanto sua aplicação ainda é representativa no contexto científico devido sua simplicidade, linguagem difundida e baixa exigência quanto a recursos computacionais para sua aplicação (CHEN, 2009). Os modelos analíticos utilizam-se tanto de simplificações da geometria do ambiente ou espaço construído, quanto das condições de borda do fluido (condições iniciais como: temperatura, densidade,

⁹ Descreve o comportamento de um fluido de fluxo laminar ao longo de um duto, satisfeitas as condições iniciais com relação a densidade, viscosidade, e velocidade do fluido -. (MASSEY e SMITH, 2002).



viscosidade, etc.). Dessa forma, a equação obtida para um determinado caso não pode ser aplicada a outro sem que sejam considerados os devidos ajustes.

Os modelos empíricos, segundo Chen (2009), se diferem dos modelos analíticos por utilizarem um número maior de aproximações – representadas na equação em forma de constantes – obtidas de forma empírica por meio de medições experimentais ou simulações computacionais específicas. À exceção desse aspecto, em teoria, os modelos analíticos e empíricos são semelhantes. Para Santamouris e Dascalaki (2002), esses dois modelos se tornam úteis por oferecerem uma primeira estimativa rápida de aspectos fundamentais para a análise da ventilação natural – a exemplo de uma estimativa da quantidade de fluxo de ar necessária para determinado ambiente.

A Equação 3. 1 e a Equação 3. 2 exemplificam as diferenças entre o modelo analítico e o empírico. A primeira equação foi desenvolvida por Fitzgerald e Woods (2008) para estudar a influência do efeito chaminé sobre o padrão do fluxo e da estratificação da temperatura do ar em ambientes ventilados naturalmente por duas aberturas (como mostra a Figura 3. 5). Nota-se que não são utilizadas constantes, mas apenas variáveis relacionadas com o caso estudado pelos autores. Já a segunda

equação é largamente utilizada para o cálculo do fluxo de ar em ambientes ventilados unilateralmente, apresentada por autores como Chandra e Swami (1987), Santamouris e Dascalaki (2002) e Chen (2009) – em que a constante “0,025” foi obtida de forma empírica.

Equação 3. 1

$$\Delta T = \left(\frac{Q_H^2}{\alpha \rho^2 C_p^2 A^2 g (H - h_B)} \right)^{1/3}$$

Onde:

ΔT = elevação da temperatura no ambiente;

Q_H = fluxo de calor distribuído;

α = coeficiente específico;

ρ = densidade do fluido;

C_p = calor específico;

A = área efetiva de abertura;

g = gravidade.

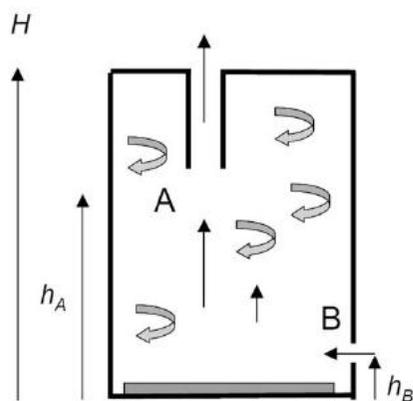


Figura 3. 5 - Representação gráfica da equação de Fitzgerald e Woods, com relação ao fluxo de ar uniforme em um recinto aquecido na base e ventilado por duas aberturas. Fonte: adaptado de Fitzgerald e Woods (2008, p. 1720)

Como afirma Chen (2009), existem centenas de modelos analíticos e empíricos destinados à predição do comportamento do fluxo de ar. Por outro lado, apenas uma pequena parte é destinada ao cálculo do nível de concentração de poluentes, se comparada ao número de equações que tratam de aspectos de conforto térmico – como se pode identificar em trabalhos como os de Allard (2002), Ghiaus e Allard (2005), Seppanen (2006), e Santamouris e Wouters (2006). Por exemplo, Seppanen (2006) apresenta uma das poucas equações analíticas utilizadas para a predição da taxa de ventilação necessária para o controle de poluentes (Equação 3. 3). Essa equação, aparentemente simples, relaciona a geração de poluentes, as diferentes concentrações de poluentes entre o ar interno e externo, e a eficiência da ventilação (quando essa for a única forma de remoção dos poluentes do ambiente).

Equação 3. 2

$$Q_w = 0.025A_{eff}U_w$$

Onde:

Q_w = fluxo de ar fornecido pela janela;

A_{eff} = área efetiva da abertura;

U_w = velocidade do ar incidente na janela.



Equação 3. 3

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,o}} \cdot \frac{1}{\epsilon_v}$$

Onde:

Q_h = fluxo de ar necessário para a qualidade do ar;
em relação a cada contaminante no ar;

G_h = geração do contaminante;

$C_{h,i}$ = concentração aceitável de contaminante no ar interno;

$C_{h,o}$ = concentração de contaminante no ar que entra;

ϵ_v = eficiência do sistema de ventilação.

Em teoria, essa equação pode ser aplicável às etapas iniciais de desenvolvimento do projeto – dada a simplicidade de sua resolução. No entanto, Seppanem (2006) aponta a dificuldade de conhecimento das fontes de poluentes e dos níveis de concentração como principal fator limitante para sua aplicação. Somado a isso, a equação apresenta a eficiência do sistema de ventilação (ϵ_v) como variável, sendo que essa não é conhecida quando se trata de ventilação natural.

Além de restrições quanto aos aspectos de QIA relacionados com a saúde humana, de forma geral, os modelos analíticos e empíricos não consideram a interferência das divisões

internas do edifício – considerando o ambiente como único. Dessa forma, por possuírem uma linguagem estritamente matemática como ferramenta de aplicação, esses modelos assumem simplificações nas condições iniciais (condições de contorno), tanto em relação à geometria do ambiente, quanto às características físicas do fluido em estudo. Essas simplificações assumidas nos modelos analítico e empírico reduzem a precisão dos resultados, quando comparados aos demais tipos de modelo, inviabilizando a sua aplicação para estudos de caso mais complexos. Por outro lado, modelos analíticos e empíricos complexos ou híbridos (ex.: utilizados em conjunto com modelos CFD ou em escala) exigem uma significativa carga de cálculos e habilidade matemática dos usuários, além de aumentarem o tempo e o custo de obtenção dos resultados esperados.

3.1.2. Modelos Multizona

De início, é importante tornar claro que a nomenclatura utilizada para denominar os modelos multizona pode variar entre os autores. Como afirma Axley (2006), tal fato é



atribuído ao próprio desenvolvimento do modelo ao longo do tempo e às diferentes tradições de linguagem de cada autor. Assim, na revisão da literatura sobre o tema, podem-se encontrar denominações como: modelo de rede (*network models*), modelo multizona, modelo multicelular (*multi-cell*), modelo multirecintos (*multi-room*).

Independentemente de suas diferentes denominações, e de algumas variações de base teórica, trata-se do mesmo princípio básico – em que cada zona de uma edificação é representada por um “nó de pressão”¹⁰. Também são utilizados “nós de borda”¹¹ para representar o meio externo da edificação, e pontos onde existe interação entre os nós de pressão no interior do edifício (Figura 3. 6). Forma-se, portanto, uma malha, ou sistema, onde são resolvidas equações de conservação de massa, momento e energia, para se determinar o número de renovações de ar e/ou sua distribuição no edifício – processo abordado por autores como Feustel e Smith (1997); Santamouris e Dascalaki (2002); Heiselberg *et al.*, (1998); Axley (2006); Dols (2001).

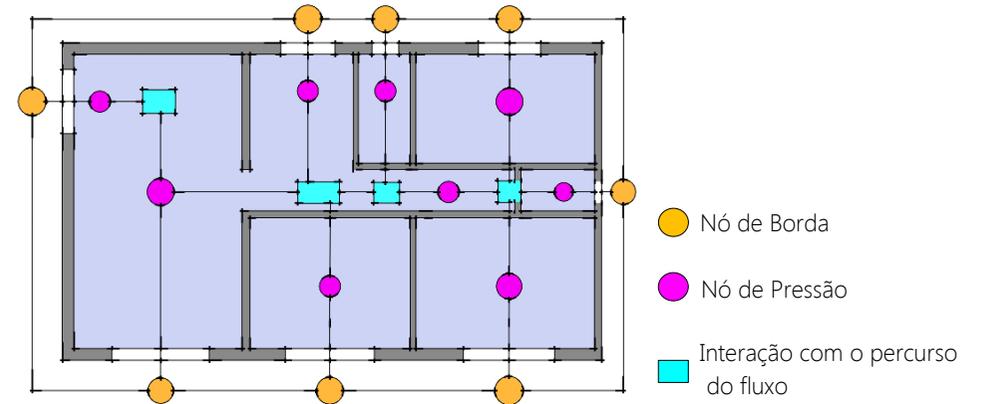


Figura 3. 6 - Representação, em planta, do princípio da malha de nós referente aos modelos multizona.

Santamouris e Dascalaki (2002) e Axley (2007) fazem uma descrição mais específica dos modelos multizona, em que ficam claras as principais vantagens desse modelo em relação aos modelos analíticos e empírico, quais sejam: a possibilidade de análise ou predição conjunta dos ambientes da edificação, e a consideração de interações no fluxo de ar que ocorrem entre esses ambientes. Assim, uma edificação com “ N ” zonas é representada por uma malha de “ N ” nós, e os nós onde se deseja calcular a pressão se comunicam com os nós do meio externo (onde a pressão é conhecida ou estimada). A interação através

¹⁰ Ponto que representa as condições de pressão do ambiente, as quais se deseja determinar após a interação com os demais nós da malha.

¹¹ Ponto em que são inseridas as informações (conhecidas ou impostas) em relação à pressão exercida no exterior do edifício.



das ligações entre os nós da malha representa o fluxo de ar através de uma abertura. Dessa forma, segundo os autores, como a taxa de fluxo de ar está diretamente relacionada à diferença de pressão através de uma abertura, as pressões nos nós internos são determinadas por meio das pressões nos nós externos – ou seja, o cálculo das pressões não conhecidas é derivado da aplicação de balanço de massa em cada nó.

Segundo Axley (2006 e 2007) e Chen (2009), além de aspectos relacionados ao conforto térmico, os modelos multizona também são utilizados para calcular aspectos relacionados à eficiência da ventilação, ao consumo energético, à retirada de poluentes do ar (agentes químicos e biológicos), e ao controle da fumaça de tabaco em ambientes climatizados artificialmente. Entretanto, dependendo do tipo de ferramenta utilizada para sua aplicação e o tipo de resultado a ser obtido, simplificações são aplicadas a esses modelos, interferindo, em determinados casos, de forma considerável na precisão dos resultados. Podem-se destacar, como exemplos de simplificações assumidas nesse modelo, o volume de ar em repouso no interior dos ambientes e a uniformidade em sua temperatura e concentração de poluentes.

Para a aplicação do modelo multizona podem ser utilizadas ferramentas puramente matemáticas (equações), ou ferramentas de modelagem computacional (*softwares*). Contudo, as ferramentas de modelagem computacional se destacam em termos de aplicação, sobre as quais, segundo Feustel e Kendon (1985), foram publicados 26 artigos provenientes de oito países diferentes – descrevendo 15 tipos de modelos multizona ainda no ano de 1985. Dentre a diversidade de ferramentas de modelagem computacional, dois programas se destacam: o CONTAM (família de programas) e o COMIS.

Os programas da família CONTAM, desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Normas e Tecnologia dos Estados Unidos (NIST), auxiliam na determinação do fluxo de ar, das pressões relacionadas à ação dos ventos ou diferença de temperatura do ar, e da concentração de poluentes em recintos (WALTON e DOLS, 2005). Não obstante, percebe-se um viés mais voltado para a análise da qualidade do ar interno em termos de concentração de poluentes e dimensionamento de sistemas de ventilação (não especificamente ventilação natural). Dols (2001) apresenta o programa LoopDA (que utiliza a plataforma CONTAM), o qual foi desenvolvido pelo NIST especificamente para o projeto de pequenas edificações comerciais ventiladas



naturalmente – todavia, não possui aplicação significativa em comparação ao CONTAM. A Figura 3. 7 e a Figura 3. 8 exemplificam a linguagem do programa CONTAM e do programa LoopDA na representação do edifício real (estudo de caso) e do conjunto de zonas – em que, para cada zona, são atribuídos nós de borda e de pressão.

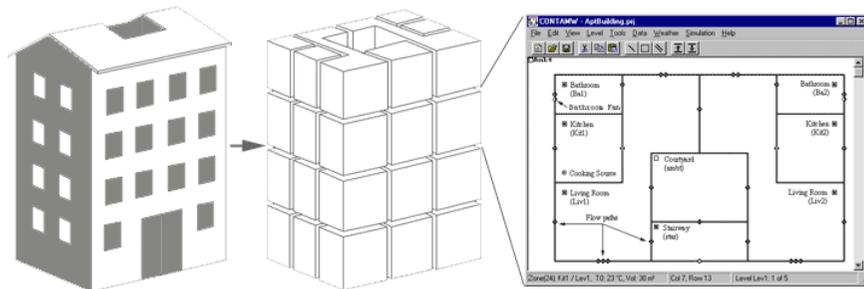


Figura 3. 7 - Representação do edifício no programa CONTAM – modelo multizona. Fonte: adaptado de Dols (2001, p. 36 e 37).

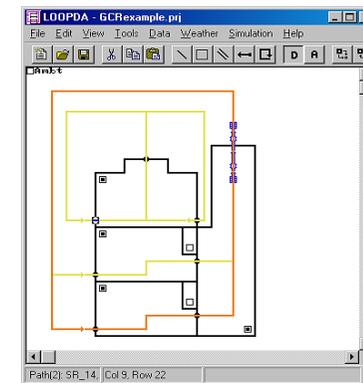
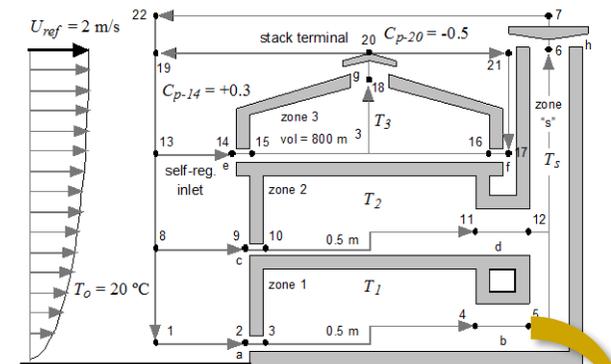


Figura 3. 8 - Geometria, em corte, do estudo de caso feito por Axley (2006) – analisado no programa LoopDA. Fonte: adaptado de Dols e Emmerich (2003, p. 18 e 20)



O programa COMIS foi desenvolvido pelo Grupo de Performance Energética em Edifícios da Universidade de Berkeley, nos Estados Unidos, com a colaboração de um grupo de pesquisadores de países da Europa e da Ásia. O programa é utilizado para o cálculo do efeito da velocidade do ar nos campos de pressão atuantes sobre o edifício, na predição do fluxo e retirada de contaminantes do ar, e na determinação da diferença de temperatura do fluxo do ar entre zonas/ambientes – como abordado por Feustel e Smith (1998), Khoukhi *et al.* (2007), Maatouk (2007), e Chen (2009). Além disso, o programa se destaca pela possibilidade de integração com outros *softwares* de análise termo-energética, como é o caso do programa EnergyPlus¹² e das interfaces desenvolvidas para torná-lo mais amigável e funcional (ex.: IISiBat, XCOMIS, COMERL.) (Figura 3. 9).

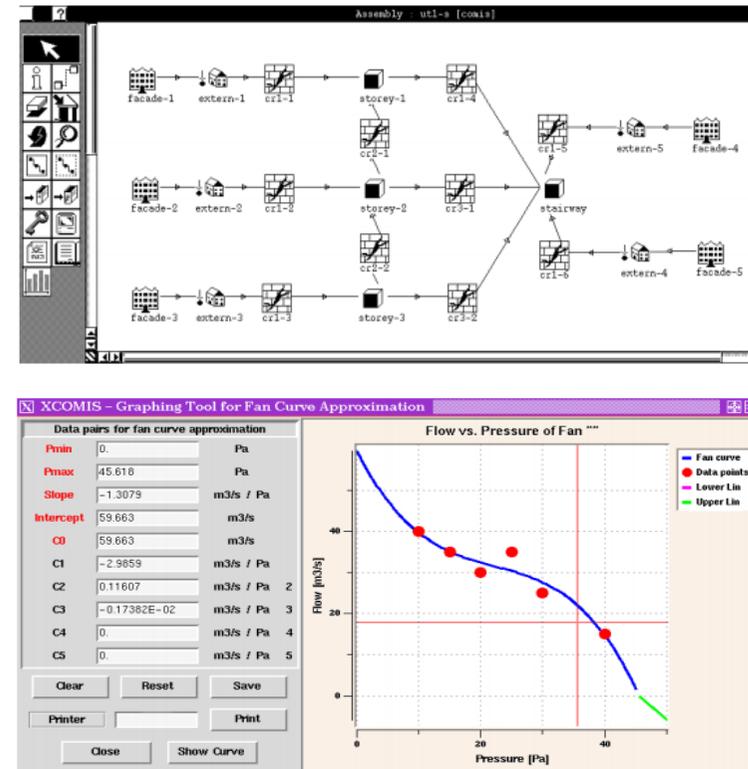


Figura 3. 9 - Interface do usuário no programa COMIS com o IISiBat (acima) e XCOMIS (abaixo). Fonte: adaptado de Feustels e Smith (1998, p. 25 e 26)

Para Chen (2009), os programas CONTAM e COMIS são semelhantes em relação aos princípios e algoritmos utilizados para a obtenção dos resultados. No entanto, Feustel e Smith

¹² O EnergyPlus é um programa de simulação do consumo energético de edifícios desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.



(1998) afirmam que o programa COMIS fornece um algoritmo mais evoluído em relação aos demais programas de aplicação do modelo multizona (ex.: ESP, BREEZE, AIRNET e PASSPORT-AIR), aumentando sua precisão e reduzindo problemas de convergência do sistema de equações.

De forma geral, como observado por Chen (2009), Crawley *et al.* (2008) e Megri (2007), as ferramentas computacionais de aplicação do modelo multizona são utilizadas em conjunto com modelos Microscópicos, visando à calibração de resultados – principalmente para análises de consumo energético. Além disso, diferentemente de programa CFD comerciais, as duas ferramentas de aplicação mais populares (CONTAM e COMIS) foram desenvolvidas por laboratórios científicos – fato que resultou na criação de uma linguagem e interface não amigáveis, além de apresentação gráfica dos resultados não atrativa para profissionais de mercado (arquitetos, engenheiros, etc.). Denota-se, portanto, que tais deficiências limitam significativamente a aplicação do modelo multizona a estudos no campo científico.

3.1.3. Modelos de Zona Única

O modelo de zona única (*zonal model*)¹³ apresenta uma abordagem intermediária entre os modelos multizona e os modelos CFD, como afirmam Santamouris e Dascalaki (2002). Ou seja, fornecem resultados mais detalhados em comparação aos modelos multizona, sendo, assim, de aplicação menos complexa em relação aos modelos CFD. O princípio básico do modelo de zona única consiste na subdivisão de um volume no interior do edifício (podendo ser um ambiente, ou um determinado trecho do edifício) em num número limitado de células/subvolumes – geralmente, segundo Chen (2009), menos de 1.000 células para espaços tridimensionais. Em cada subvolume são aplicadas as equações de conservação de massa, momento e energia, a fim de se obter os campos de temperatura e velocidade do ar no volume em análise.

Assim, enquanto o modelo multizona subdivide o edifício em zonas (que representam os ambientes) e realiza uma análise geral do comportamento do fluxo de ar, o modelo de zona única foca na análise de apenas um volume específico,

¹³ Também pode ser encontrado em trabalhos científicos com a nomenclatura de "modelo de sub-zona" (*sub-zone model*)



subdividindo esse em parcelas menores nas quais são aplicadas as equações de conservação. Em vista dessa análise, mais detalhada e restrita a um determinado trecho da edificação, são obtidos resultados mais detalhados como, por exemplo, a estratificação dos campos de temperatura e velocidade do ar (que não são calculados no modelo multizona). Axley (2006) apresenta uma comparação entre a aplicação do modelo de zona única e os modelos multizona e CFD – na qual ilustra, de forma mais clara, a abordagem característica e o refinamento de análise do modelo de zona única em comparação aos modelos multizona (Figura 3. 10).

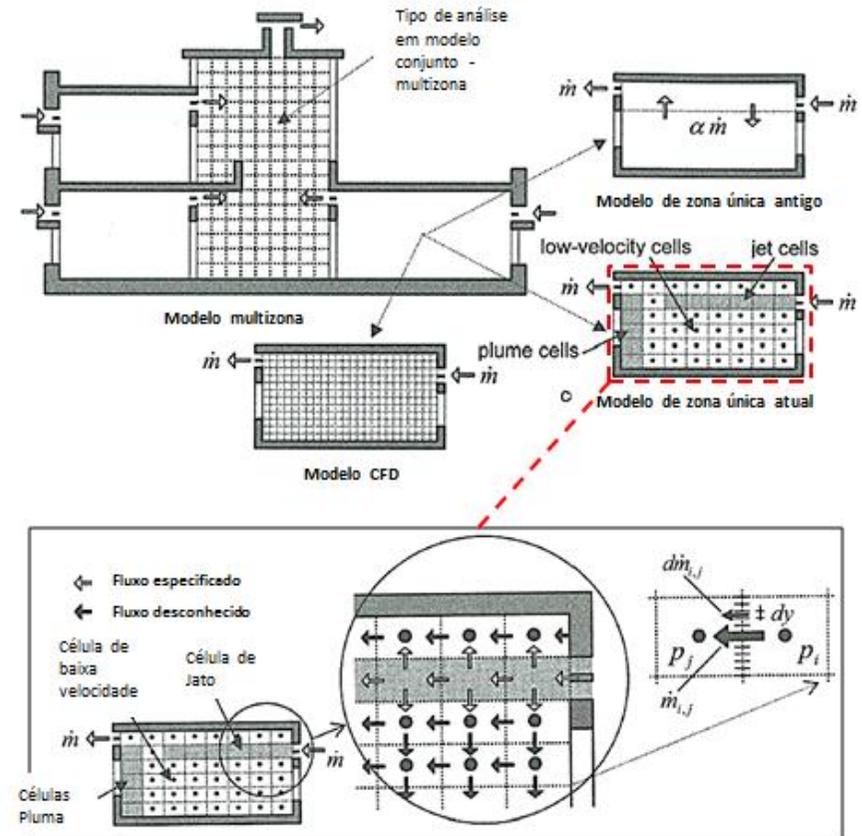


Figura 3. 10 - Comparação entre modelos em um mesmo estudo de caso – descrição detalhada do modelo de zona única. Fonte: adaptado de Axley (2006, p. 76 e 77).



O tipo de modelo de zona única, apresentado por Axley (2006), é um dos mais recentes e complexos utilizados para a predição da ventilação. O autor menciona que os modelos de zona mais recentes utilizam diferentes tipos células de fluxo (vetores) para diferentes conjuntos de células, dependendo do contexto. Dessa forma, o fluxo de ar atuante nas células – representado pelas “células de jato” nas regiões de entrada de ar por ações dos ventos, e por “células de plumas” nas regiões onde ocorre a movimentação do ar por diferença de temperatura – é estabelecido com base em um conjunto de equações já conhecidas e caracterizadas em estudos de caso anteriores, como por exemplo os de Awbi (1991), Etheridge e Sandberg (2007) e Heiselberg *et al.* (1998). Por fim, as células que não sofrem influência direta de células de jato e de plumas são caracterizadas como “células de baixa velocidade” – as quais terão seu regime alterado devido à influência das demais células, conforme exemplificado na Figura 3. 10.

Por outro lado, é possível identificar modelos de zona única com abordagens e níveis de complexidade diferentes, dependendo do tipo de modelo de zona única. Por exemplo, Heiselberg *et al.* (1998) e Santamouris e Dascalaki (2002) mencionam duas abordagens mais simplificadas dos modelos de

zona única, em relação à abordagem apresentada por Axley (2006). Na primeira abordagem, denominada “modelo de temperatura”, um padrão ao movimento do ar dentro do edifício é imposto, tendo como base resultados de outros estudos de caso – obtidos por modelos mais detalhados. Em vista disso, esse tipo de abordagem não é aplicável em qualquer tipo de geometria (configuração do edifício). A segunda abordagem é denominada de “modelo de pressão”, em que uma equação simplificada (com momento nulo), baseada nas equações de Bernoulli, é inserida como equação adicional. Esse modelo é de abrangência mais geral em comparação ao “modelo de temperatura”, não apresentando a necessidade de uma definição do padrão do fluxo de ar (SANTAMOURIS e DASCALAKI, 2002).

Em termos de ferramentas de aplicação, os modelos de zona simples utilizam programas diversos, de linguagem matemática, que auxiliam na resolução das equações impostas. No entanto, não foi possível identificar na literatura um programa específico que se destaque ou de uso comercial que seja desenvolvido especificamente para a predição da ventilação natural. Como aborda Chen (2009), a revisão dos trabalhos científicos publicados sobre esses modelos aponta para uma utilidade prática “insignificante” – a maioria dos estudos possui



como objetivo o próprio desenvolvimento do modelo ou análise comparativa de resultados obtidos por modelos multizona, CFD, e em escala. Por fim, o autor afirma que, em geral, as habilidades exigidas do usuário e o tempo necessário para a preparação dos dados de entrada nos modelos de zona única são comparáveis aos modelos CFD (até maior em determinados casos). Dessa forma, apesar de se caracterizarem como um modelo Macroscópico, os modelos de zona única mais recentes apresentam certo grau de complexidade comparáveis aos modelos Microscópicos. Tal fato não favorece a utilização desse modelo nas etapas iniciais do projeto arquitetônico, nas quais busca-se uma primeira avaliação – mais simplificada e rápida – da ventilação natural.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS MACROSCÓPICOS

3.2.1. Modelos em Escala

Os modelos em escala utilizam métodos e ferramentas de medição para a predição e/ou análise do escoamento do fluxo de ar – podendo ser caracterizados, conforme a escala aplicada para o desenvolvimento da maquete do caso a ser estudado, como: modelo em escala reduzida e modelo em escala real. Devido ao menor custo de desenvolvimento e análise (em comparação com o modelo em escala real), os modelos em escala reduzida são mais amplamente conhecidos em termos de análise da ventilação, como aborda Chen (2009). Contudo, devem ser observadas, de forma cuidadosa, as características do fluido utilizado em cada método de abordagem – tendo em vista os diferentes tipos de fluidos que podem ser simulados em câmaras ou túneis de vento (ex.: querosene, areia, água, entre outros) (Figura 3. 11).

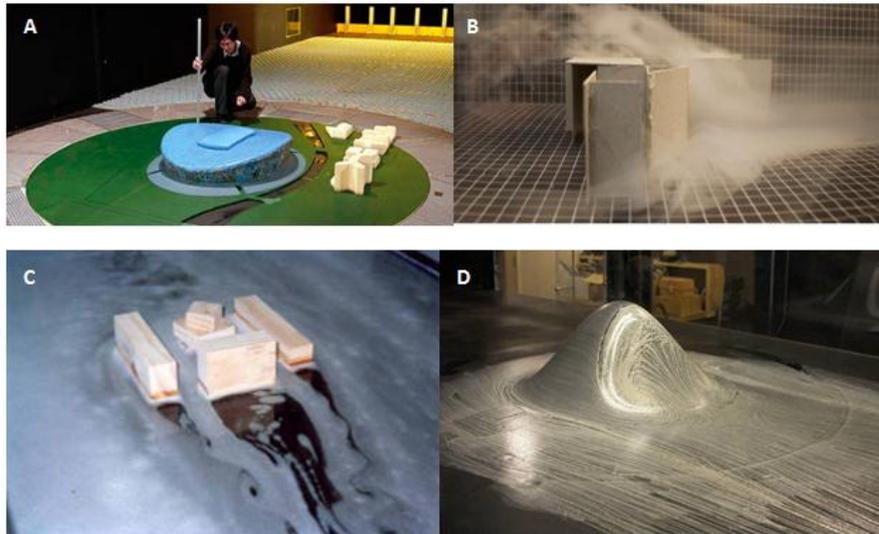


Figura 3. 11 - Exemplos de análise em túnel vento –utilizando ar (a); análise em túnel de vento – utilizando fumaça (b); análise em mesa d’água – utilizando água com adição de sabão (c); análise em túnel de vento – utilizando óleo (d).Fonte: (a - <http://www.bmt.org/markets/buildings-infrastructure-and-rail/wind-tunnel-testing/>), (b - <http://architecturaldesigner.dk/>); (c – Toledo e Pereira, 2003, p.1388), (d - http://www.nasa.gov/centers/ames/multimedia/images/2012/iotw/FAITH_hill.html#.U2oVwfldW4k).

As características a serem observadas estão relacionadas principalmente com o número de Reynolds¹⁴, número de Grashof¹⁵, entre outros. Como aborda Chen (2009), em análises que envolvem transferência de calor (um dos principais motivos para a utilização dos modelos em escala) há dificuldade na obtenção do mesmo número de Reynolds e Grashof nos modelos em escala reduzida que utilizam o ar como fluido principal para as análises, fato que interfere significativamente nos resultados obtidos. A utilização de fluidos com densidade diferente da densidade do ar, como a água ou o Freon¹⁶, é uma opção para atenuar essas diferenças – uma vez ponderados os diferentes parâmetros do fluido utilizado no resultado final.

Além do tipo de fluido utilizado, outras variáveis estão diretamente relacionadas com a consistência dos resultados obtidos nos modelos em escala, tais como: a característica e

¹⁴ Coeficiente adimensional inversamente proporcional à viscosidade do fluido, e diretamente proporcional à massa específica e velocidade do fluido, e ao diâmetro da tubulação por onde o mesmo percorre. É empregado na Mecânica dos Fluidos no cálculo do regime de escoamento laminar ($Re < 2000$), ou turbulento ($Re > 2400$).

¹⁵ Coeficiente adimensional que representa a relação entre a força de flutuação e a força de retenção de um determinado fluido, derivada de sua variação de viscosidade (ocasionada pela diferença de sua temperatura) (MASSEY e SMITH, 2002).

¹⁶ Gás derivado do metano.



calibração da câmara/túnel, a velocidade e direção do vento simulados, o detalhamento e representação do modelo físico e seu entorno (Figura 3. 12), a qualidade dos equipamentos de medição, entres outro aspectos – amplamente descritos por autores como Armtti e Counihan (1969), Holmes (2001), Ahmad *et al.* (2005), Toledo (2006), e Faria (2012).

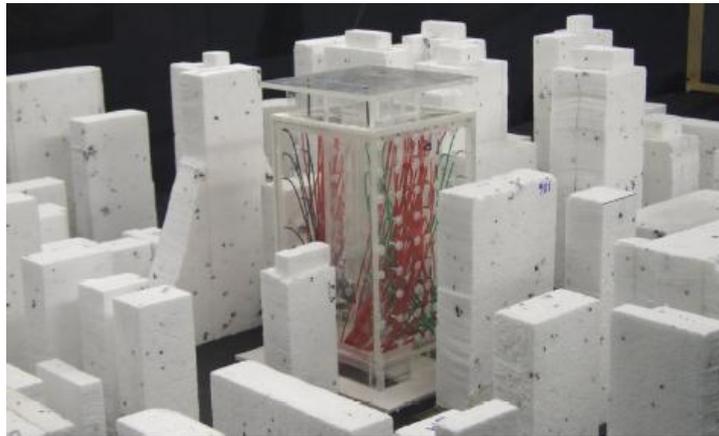


Figura 3. 12 - Representação do nível de detalhamento do modelo físico (edifício e entorno) analisados em túnel de vento. Fonte: adaptado de Faria (2012, p. 184)

Por meio da revisão da literatura sobre o modelo em escala reduzida, Chen (2009) identificou a grande utilização desse tipo de modelo para a validação de resultados obtidos em modelos analíticos e empíricos, assim como para a análise comparativa entre modelos computacionais multizona, de zona única e CFD. A utilização dos modelos em escala reduzida também aplicável visando à visualização do escoamento do fluido sobre os elementos construídos (TOLEDO e PEREIRA, 2003; DRACH *et al.* 2010). Por exemplo, Drach *et al.* (2010) aborda a aplicação prática destes modelos em experimentos realizados em túnel de vento, utilizando o “arrasto de areia”, para auxiliar os projetistas na especificação de diretrizes de projeto que visem o conforto térmico urbano. Toledo (2006) e Toledo e Pereira (2003) também utilizam modelos em escala, utilizando uma mistura aquosa, para a visualização e estudo quantitativo e qualitativo do escoamento do fluido.

Entretanto, considerando os custos com equipamentos e o tempo envolvidos entre a construção do modelo físico (maquete), esse tipo de modelo possui aplicação restrita a casos específicos, geralmente: projetos de pesquisa em universidades, edifícios construídos ou em estágio avançado de projeto. Por exemplo, durante as etapas de desenvolvimento do



projeto, em que alterações de forma e de *layout* internos estão passíveis de modificações diversas, seria necessária a construção de um número considerável de modelos físicos (representando as alternativas de projeto) – fato que isoladamente já representa um fator negativo em relação aos modelos computacionais e modelos analítico/empíricos. Analisando sob outra ótica, não é necessariamente fundamental a obtenção de dados tão precisos e específicos (como os obtidos por meio dos modelos em escala) que justifiquem investimentos elevados de tempo e recursos para a identificação de possíveis diretrizes e alternativas gerais durante o desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto.

Nesse sentido, a presente tese não aborda o modelo em escala real – uma vez que os custos e o tempo requeridos nesse modelo são consideravelmente maiores em relação ao modelo em escala reduzida. Grosso modo, cabe mencionar que sua aplicação no campo da ventilação (natural ou artificial) é limitada à análise de edificações existentes (medições *in loco*) ou experimentos de laboratório – tema abordado por autores como Liddament (1986), Larsen e Heiselberg (2008), Sandberg (2007). Por fim, vale ressaltar que os resultados obtidos por meio desse modelo são os mais precisos na predição e análise da ventilação, em comparação aos demais modelos. No entanto, como aborda

Melikov *et al.* (2007), esse modelo não está livre de erros, tendo em vista todo o processo envolvido nas medições e a calibração dos equipamentos.

3.2.2. Modelos Computacionais de Dinâmica dos Fluidos

Para autores como Awbi (1991), Santamouris e Dascalaki (2002), Heiselberg *et al.* (1998), Axley (2006), e Chen (2009), dinâmica dos fluidos computacional é uma ciência baseada na resolução de um conjunto de equações diferenciais parciais de conservação de massa, momento, energia (equações de Navier-Stokes¹⁷), concentração de espécies químicas, e intensidade de turbulência. Como aborda Benson (2012), inicialmente, devido à complexidade envolvida na resolução das equações de Navier-Stokes, uma série de simplificações e aproximações foi feita para se obter um grupo de novas equações que pudessem ser resolvidas. Ao longo das três últimas

¹⁷ Desenvolvida em estudos independentes por G.G. Stokes, na Inglaterra, e M. Navier, na França – no início de 1800 – essas equações descrevem como estão relacionadas a velocidade, a pressão, a temperatura e a densidade de um fluido em movimento.



décadas, difundiu-se a utilização de computadores de alto desempenho para a resolução aproximada das equações originais por meio de diversas técnicas, tais como: Método dos Volumes Finitos¹⁸ (Figura 3. 13), Método dos Elementos Finitos¹⁹, entre outros. Assim, essa área de estudo passou a ser conhecida como Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

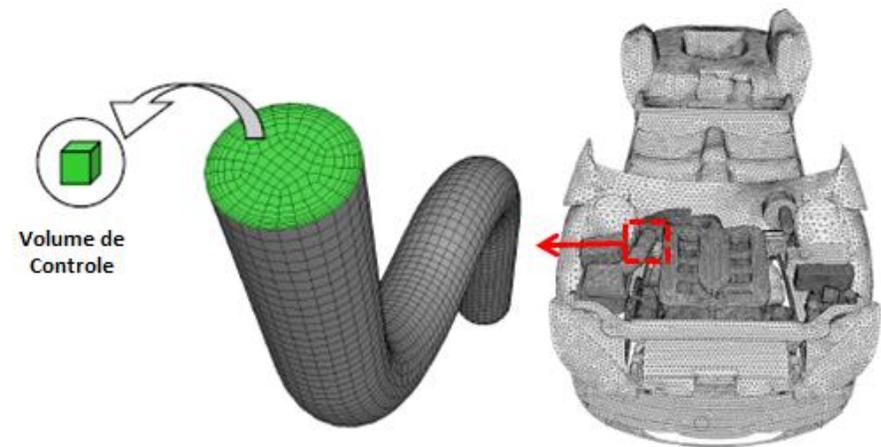


Figura 3. 13 - Discretização de um estudo de caso (veículo) por meio do método de volumes finitos – modelo CFD. Fonte: adaptado de ESSS (2012).

Os modelos computacionais de dinâmica dos fluidos predizem o escoamento de um fluido, a transferência de massa e calor, reações químicas, entre outras diversas aplicações – não somente no campo da arquitetura e engenharia, mas também em áreas como a medicina (estudo dos vasos sanguíneos, bombeamento do sangue, etc.), a petroquímica (extração e refinamento de petróleo), a engenharia aeronáutica, engenharia naval, e outras. Na previsão da ventilação, os modelos CFD podem fornecer resultados quanto aos campos de distribuição da

¹⁸ O Método dos Volumes Finitos baseia-se na realização de balanço de massa, movimento, e/ou energia sobre um volume de controle determinado – no qual o fluxo em estudo atravessa as face do volume (JUNIOR, 2012).

¹⁹ O Método dos Elementos Finitos baseia-se na discretização de um determinado domínio, representando-o como uma reunião de um número finito elementos, de forma a resolver não o problema na forma original, e sim um que lhe é associado. (AZEVEDO, 2003; GIACCHINI, 2012)



pressão, velocidade, temperatura, e concentração de humidade, e contaminantes no ar – tanto em ambientes internos como no espaço urbano, como abordam os trabalhos de Souza (2006) e Sales (2013) (Figura 3. 14 e Figura 3. 15).

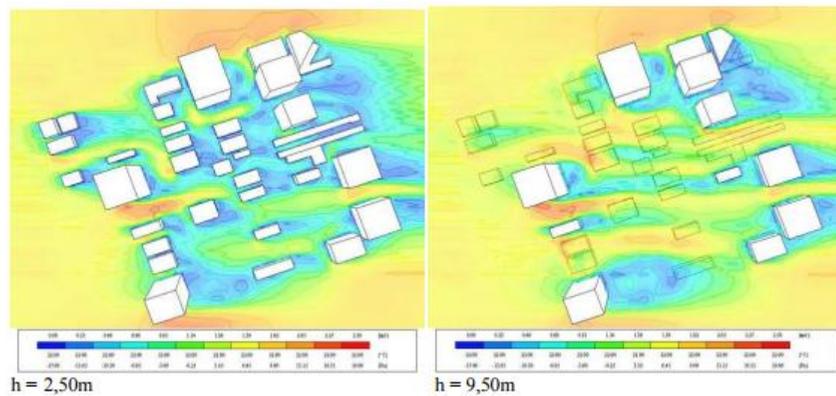


Figura 3. 14 - Estudo de escoamento da ventilação natural no espaço urbano. Fonte: Souza (2006, pg 96).

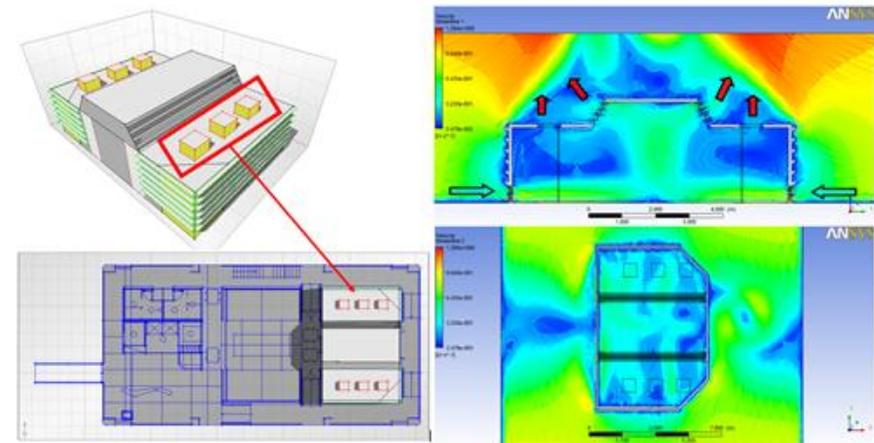


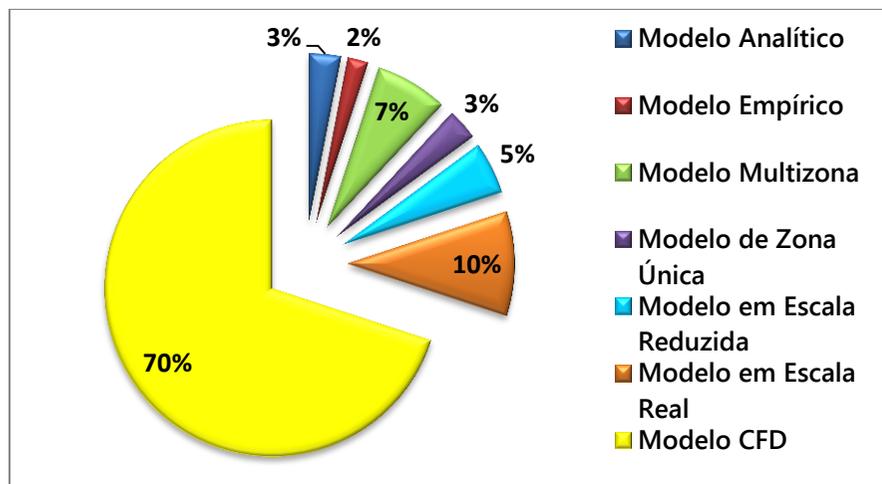
Figura 3. 15 - Estudo de distribuição e velocidade do fluxo de ar interno em unidade do Centro de Visitantes Flutuante do ICMBio. Fonte: Sales (2013).

Como afirma Chen (2009), devido à disseminação do estudo do escoamento dos fluidos e ao avanço em termos de desenvolvimento de interfaces mais amigáveis, o modelo CFD se tornou o meio mais utilizado para a predição da performance da ventilação (natural e artificial) (Gráfico 3. 1). Em termos de aplicação, nos programas computacionais de dinâmica dos fluidos vem sendo elaborados e aplicados desde os anos 80 – sendo, desde então, tema de revisões que buscam identificar qual é a ferramenta mais precisa (AWBI, 1991; LIDDAMENT, 1996;



ETHERIDGE e SANDBERG, 2007; HEISELBERG *et al.*, 1998; SANTAMOURIS e DASCALAKI, 2002; AXLEY, 2006). Por meio dessas revisões, pode-se observar toda a complexidade (e evolução) envolvida no desenvolvimento desse modelo – não cabendo, para a presente tese, entrar na discussão já abordada de forma bastante completa pelos autores mencionados.

Gráfico 3. 1 - Percentual de modelos utilizados para a predição da ventilação (natural ou artificial) em trabalhos publicados somente no ano de 2007. Fonte: adaptado de Chen (2009, p.855)



Em termos de aplicação durante o desenvolvimento do projeto, os modelos CFD possuem como vantagem a integração com programas de auxílio ao desenho arquitetônico (CAD) e programas de modelagem da informação de edifícios (BIM), como AutoDesk© REVIT; e de simulação energética, como o *DesignBuilder*. Assim, torna-se possível analisar aspectos da ventilação na medida em que o projeto for modelado no computador. Em comparação aos modelos em escala, analíticos e empíricos, a quantidade de tempo necessária para a obtenção de resultados no modelo CFD é consideravelmente menor – e com alto nível de precisão. Em comparação com todos os demais modelos, a representação gráfica dos resultados obtidos no modelo CFD (dependendo do programa/ferramenta utilizada) também é um fator positivo para a visualização dos resultados e identificação das soluções.

Por outro lado, o nível de precisão dos resultados fornecidos, o tempo necessário entre a modelagem e a obtenção dos resultados, e o nível de detalhamento do projeto, são variáveis que dependem da habilidade técnica do usuário da ferramenta e da qualidade dos equipamentos (*hardwares* e *softwares*) disponíveis. Esses fatores representam custos para o projetista, que devem ser considerados para se justificar a



aplicação do modelo CFD durante o Estudo Preliminar de Projeto. Soma-se a isso, a necessidade de validação dos resultados obtidos para que se tenha uma análise confiável. No caso da ventilação natural, a validação dos resultados geralmente não é um processo simples, tendo em vista a característica extremamente variável desse fenômeno e a estaticidade das simulações feitas no modelo CFD²⁰ – exigindo a validação dos diversos cenários possíveis (como, por exemplo, as variações anuais de temperatura e umidade do fluido).

²⁰ As simulações estáticas, no campo da arquitetura e urbanismo, são aquelas que fornecem um “retrato” estático de determinada situação, tendo como base as informações pontuais inseridas pelo usuário. Ou seja, não fornecem um perfil anual, mensal, semanal, diário, etc.; tendo como base um arquivo climático (que reúne as características do clima da local) – tipo de informação que pode ser obtida em simulações dinâmicas.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS GRÁFICOS

Para autores como Lauritzen (1996), Jordan (1998), Jensen (2001), e Koller *et al.* (2007), os modelos gráficos podem ser definidos como a união entre a teoria da probabilidade²¹ e a teoria dos gráficos²², fornecendo uma abordagem baseada em princípios e/ou conjecturas para tratar de incertezas através do uso da probabilidade – abordagem eficaz para se lidar com problemas complexos por meio da teoria dos gráficos. Os modelos gráficos se destacam tanto por sua flexibilidade e capacidade de representação, quanto pelo aumento da capacidade de compreensão do problema por parte do usuário, e pela forma eficaz de realizar inferências – tornando-se extremamente populares para a modelagem de incertezas.

Segundo Jordan (1998), existem dois tipos de modelos gráficos: aqueles baseados em gráficos indiretos e aqueles baseados em gráficos diretos. A diferença entre eles é a

²¹ Teoria que objetiva a formulação de modelos de fenômenos naturais em que, a partir do passado, não se pode prever o futuro, mas, para os quais, pode-se encontrar taxas de realização constantes (sob certas condições), que permitem previsão de caráter geral (SPIEGEL *et al.* 2004)

²² Ramo da matemática que estuda os gráficos, os quais representam um conjunto que possui relação binária (BIN e ZHONGYI, 2010).



possibilidade de representação das condições independentes marginais e condicionais (Figura 3. 16). Além disso, assim como ocorre para os modelos multizona e de zona única, podem-se encontrar na literatura denominações alternativas para os modelos gráficos (redes de Bayesian, redes probabilísticas independentes, campos aleatórios de Markov, diagramas de influência, etc.). Por fim, Jordan (1998) também aborda algumas formas de utilização dos modelos gráficos para predição; diagnóstico, controle e otimização; e aprendizado supervisionado (Figura 3. 17).



Figura 3. 17 - Formas de aplicação dos modelos gráficos (diretos). Fonte: Jordan (1998, p. 06).

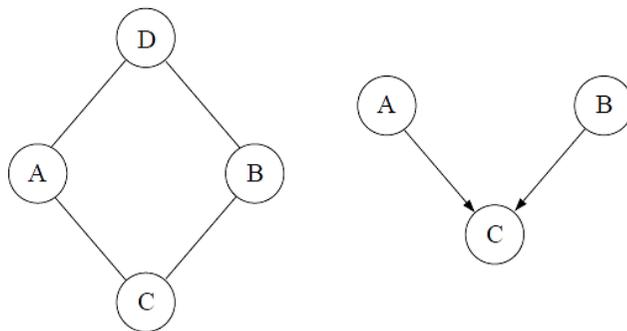


Figura 3. 16 – No modelo gráfico indireto (à esquerda), “C” depende de “A”, que depende de “D”, que depende de “B” que depende de “C”. No modelo gráfico direto (à direita), “C” depende de “A” e “B” – que são independentes. Fonte: Jordan (1998, p. 14).

Como afirma Koller *et al.* (2007), de forma geral, a estrutura que os modelos gráficos exploram representa as propriedades de independência, ou interdependência, que existem em diversas áreas do conhecimento. Por exemplo, a aplicação dos clássicos modelos gráficos de Bayesian²³ e de Markov²⁴ no campo da medicina (Figura 3. 18); o modelo gráfico, que utiliza diagramas das variáveis para a sua análise, desenvolvido por Cross (2000) para o campo da engenharia de

²³ O modelo de Redes de Bayesian (*Bayesian Networks*) é baseado em gráficos diretos, motivo pelo qual também é denominado de modelo gráfico direto (Koller *et al.* 2007).

²⁴ O modelo de Redes de Markov (*Markov Networks*) é baseado em gráficos indiretos, motivo pelo qual também é denominado de modelo gráfico indireto (Koller *et al.* 2007).



produção (Figura 3. 19); e a Ficha Bioclimática desenvolvida por Romero (2007) para o campo da arquitetura (Figura 3. 20).

qual deles teve contato com o outro. Ao lado dos modelos (A) e (B), interpretação traduzida para tabelas de probabilidade condicional – linguagem da probabilidade pela qual os modelos fornecerão suas análises.

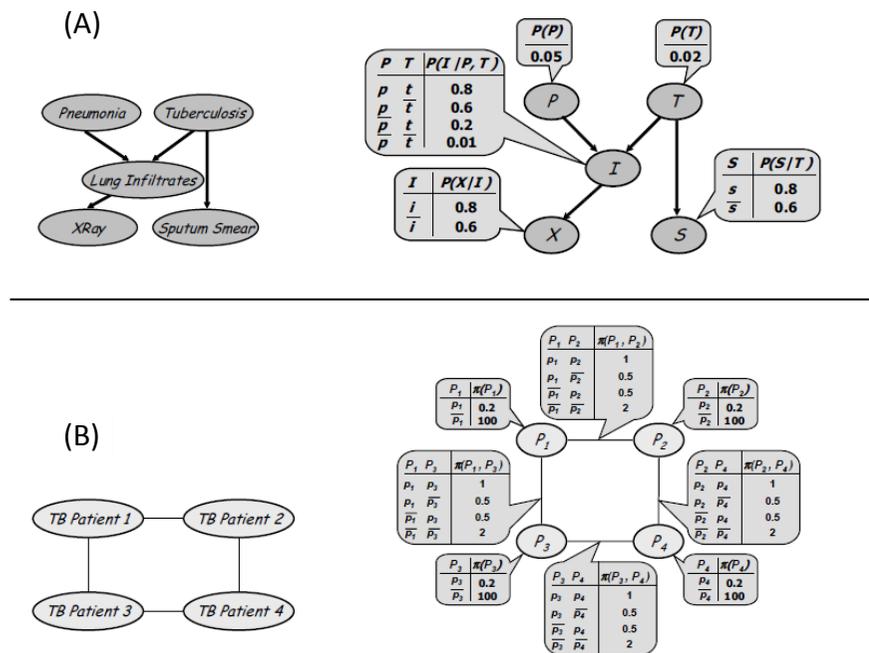


Figura 3. 18 – (A) Rede de Bayesian simples mostrando duas potenciais doenças (tuberculose e pneumonia) que podem ter provocado infiltração pulmonar no paciente – sendo que a tuberculose deve ser comprovada por meio de exame de escarro, enquanto que a pneumonia deve ser comprovada por meio de Raio X. (B) Rede de Markov simples, descrevendo o *status* da tuberculose em quatro pacientes – em que a ligação entre pacientes indica

Solutions	1	2	3	4	...
Sub-functions					
1 Lift					...
2 Sift					...
3 Separate leaves			
4 Separate stones					...
5 Sort potatoes	by hand	by friction (inclined plane)	checkrolls (hole gauge)	check mass (weighing)	...
6 Collect	Tipping hopper	Conveyor	Sack-filling device

Combination of principles

Combinação dos Princípios

Figura 3. 19 - Modelo gráfico com análise baseada no diagrama das variáveis (também denominado de análise morfológica ou diagrama morfológico), para o projeto de uma máquina de coletar tomates. Fonte: Cross (2000, p. 128).



ENTORNO		COMUNIDADE		IMPACTOS	
ACESSOS	SOL O espaço está completamente aberto à radiação solar e a suas múltiplas reflexões.		SENSAÇÃO DE COR Predomínio dos cinzas ou azúlis que dominam		COR
	VENTO Espaço aberto e exposto desde a plataforma donde está situado, suporta diferentes efeitos aerodinâmicos.		RESSONÂNCIA DO RECINTO Não possui ar encerrado que possa ser excitado por uma frequência coincidente com as suas próprias. SOMBRA ACÚSTICA		SOM
	SOM Esta próxima de duas caixas de ressonância que são os vidrões que acedem à colunária.		DIRETA Na tarde a fachada de vidro do Teatro Nacional atua especularmente. DIFUSA		RADIACÃO
CONTINUIDADE DA MASSA Não existe massa.		REFLETTIDA Forte no Teatro		CLIMA	
CONDUÇÃO DOS VENTOS Os ventos não encontram canais de condução. Na parte próxima das colunas do Conjunto Nacional tem-se o efeito redemoinho.		UNIDADE RELATIVA I r e e d o r a d e e d e e i o TEMPERATURA DO AR Diminui nas cercanias da praça. VELOCIDADE DO VENTO			
COMPONENTES E PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS	ÁREA DA BASE 40 x 110 e 80 x 110 = 6.600m ²	TEMPERATURAS SUPERFICIAIS Alta, uma exposta à radiação solar constante. ALBEDO Alto. Predominam os pavimentos o que diminui a condutividade		SOM	
	PAVIMENTOS Concreto. Calçada, pavimento articulado de pedra portuguesa. Praça de concreto asfáltico.	AMBIENTE SONORO A fachada Leste do Conjunto Nacional reflete a energia incidente e ao mesmo tempo a escassa utilidade tem uma absorção maior.			
	VEGETAÇÃO Cantárcos com flores. Arbustos Sibipirana e Fambé uni. Arbustos Baugavilea. Relva.	VARIAÇÃO SAZONAL Muito e u d No erodo e o ar red e		COR	
	ÁGUA 6 fontes de concreto	CONJUNTO DE CORES Claro e variadas. TONALIDADE Polícromia quente			
	MOBILIÁRIO URBANO Fontes. Bancos. Arbúrcinas. Postes	MANCHAS DE LUZ Criação de espaço visual único com a propagação colorida da fachada. ESTÉTICA DA LUZ Cor neutra contrasta ênfase no Teatro Nacional e colorido no CN.			

Figura 3. 20 - Ficha Bioclimática para a análise ambiental urbana. Fonte: Romero (2007, p. 195).

Como observado, as variáveis contidas nos modelos gráficos podem ser representadas livremente, por meio de letras, números, diagramas, imagens, símbolos, etc. Tal flexibilidade e capacidade de síntese de um determinado problema, tornando legível uma determinada quantidade de informações e variáveis,

podem possibilitar ao projetista a análise e o desenvolvimento de alternativas durante o Estudo Preliminar de Projeto. Uma vez que, durante essa etapa, as informações de projeto não estão necessariamente consolidadas e, conseqüentemente, existe uma margem mais ampla em termos de precisão das análises e resultados. Assim, um modelo gráfico de abordagem simples pode se tornar uma alternativa rápida, eficaz, e sem custos para o projetista.

Além disso, deixando de lado as complexidades que inviabilizam a aplicação de modelos Microscópicos, e utilizando uma ferramenta de aplicação (diagramas) de linguagem mais simples e amigável em relação aos modelos Macroscópicos, os modelos gráficos podem ser capazes de estimar, ou prever, os aspectos relacionados à QIA por meio da teoria da probabilidade aplicada ao conjunto de variáveis identificadas – Fatores Externos e Internos ao Projeto e Parâmetros Legais de Projeto.

Segundo Jordan (1998), Cross (2000), e Jensen (2001), os principais aspectos negativos desse modelo são: a especificação quantitativa e qualitativa das variáveis, e o desenvolvimento da ferramenta de aplicação do modelo. A especificação qualitativa, grosso modo, se refere à determinação da dependência ou independência das variáveis, enquanto que a



especificação quantitativa se refere ao modo como são associadas as variáveis (ordem de distribuição). Aspectos a serem tratados de forma mais específica no capítulo referente à construção da ferramenta proposta.

3.4. QUADRO COMPARATIVO DOS MODELOS APRESENTADOS

Para a análise comparativa dos modelos apresentados, foram estabelecidos parâmetros relacionados à aplicabilidade de cada modelo na etapa do Estudo Preliminar de Projeto. Os parâmetros estabelecidos foram:

- **Interface Amigável ao Projetista – Arquiteto:** considera se o modelo e suas ferramentas de aplicação possuem interface e/ou linguagem amigáveis ao profissional de projeto – mais especificamente ao arquiteto.
- **Nível de Habilidade Técnica Exigida do Usuário:** considera o nível de habilidade

técnica que o modelo e suas respectivas ferramentas de aplicação exigem do usuário para a construção, simulação/análise, e obtenção dos resultados.

- **Tempo de Modelagem e Obtenção dos Resultados:** considera o tempo necessário para o desenvolvimento do modelo físico ou computacional, da simulação/análise, do tratamento, e da obtenção dos resultados.
- **Disponibilidade / Acesso às Ferramentas de Aplicação:** considera a disponibilidade e/ou facilidade de acesso do projetista às ferramentas de aplicação do modelo de predição escolhido.
- **Custo de Aplicação durante o Estudo Preliminar de Projeto:** considera os custos envolvidos na aplicação do modelo durante a etapa de Estudo Preliminar de Projeto.
- **Qualidade Gráfica / Visualização dos Resultados:** considera a forma como os resultados são apresentados, tendo em vista a melhor compreensão e identificação de problemas e elaboração de diretrizes.



- **Nível de Precisão dos Resultados:** considera o nível de precisão dos resultados obtidos por meio do modelo.
- **Flexibilidade para Analisar as Variáveis de Projeto em Termos de QIA:** considera a flexibilidade (capacidade de adaptação) da ferramenta de aplicação do modelo em relação às variáveis de projeto em termos de QIA. Por exemplo, a capacidade de adaptação de equações do modelo analítico para analisar um conjunto de informações, ou a flexibilidade de alteração de modelos em escala para analisar cenários diferenciados.

Além do estabelecimento dos parâmetros que comporão a análise comparativa entre os modelos, também se tornou necessária a determinação de uma forma de se quantificar os mesmos. Com base nos aspectos positivos e negativos identificados na revisão da literatura sobre os modelos, optou-se por uma quantificação numérica adimensional simples (de 0 a 1 – com nível intermediário 0,5), em que: “1” possui a conotação de “alto”, 0,5 possui a conotação de “médio”, e “0” possui a

conotação de “baixo”. Importante destacar que o significado da quantificação depende do parâmetro a ser analisado, por exemplo, “0” (baixo) pode possuir significado negativo em termos de qualidade gráfica, mas possui significado positivo em termos de custo de aplicação. Da mesma forma, a atribuição do “0” a um determinado modelo não que dizer que seu custo de aplicação ou tempo de modelagem é zero ou que não exista – mas sim, que seu custo de tempo de modelagem são mais baixos em relação a outros modelos com pontuação superior, e vice-versa.

A Tabela 3. 1 apresenta a quantificação estimada pela presente tese para os modelos de análise e predição abordados. Para melhor compreensão, também foi utilizado um sistema de cores para destacar quando a pontuação é positiva (em verde), e quando é negativa (em vermelho), a pontuação intermediária é em todos os casos na cor amarela. Uma análise individualizada das informações presentes na (Tabela 3. 1).



Tabela 3. 1 - Quantificação dos modelos de análise e predição em relação aos parâmetros estabelecidos.

	Modelo Analítico	Modelo Empírico	Modelo Multizona	Modelo de Zona Única	Modelo em Escala Reduzida	Modelo em Escala Real	Modelo CFD	Modelo Gráfico
Amigável ao Projetista - Arquiteto	0	0	0,5	0	0	0	1	1
Nível de habilidade técnica exigido do usuário	1	1	0,5	1	1	1	1	0
Tempo de modelagem e obtenção dos Resultados	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0
Disponibilidade / Acesso às ferramentas de aplicação	1	1	1	0,5	0	0	0,5	1
Custo de Aplicação durante o EPP	0	0	0,5	0,5	1	1	1	0
Qualidade Gráfica / Visualização dos Resultados	0	0	0,5	0,5	1	1	1	0,5
Nível de Precisão dos Resultados	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5
Flexibilidade para analisar as variáveis de Projeto - QIA	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	1	1



Pode-se identificar que, para os parâmetros estabelecidos e com vistas ao desenvolvimento do Estudo Preliminar de Projeto, o modelo gráfico apresenta vantagens (pontos positivos) em relação aos demais modelos – evidenciando seu potencial para o desenvolvimento da ferramenta a fim de atender aos objetivos pretendidos pela presente tese (principalmente a facilidade de acesso e uso, e baixo custo para o projetista). A tabela comparativa entre os modelos deixa clara a tendência do modelo gráfico de possuir interface amigável, de exigir pouca habilidade técnica em seu manuseio, de seu potencial de ser disponibilizado facilmente, e de sua flexibilidade de análise/predição das variáveis de interesse – pontos esses a que os demais modelos possuem uma tendência menos favorável.

Resumo do Capítulo

O presente capítulo aborda o processo de desenvolvimento do Diagrama de Ventilação Natural. Primeiramente, é apresentada a organização das Categorias, dos Itens, e das Opções (variáveis) que o usuário poderá analisar com a ferramenta. Posteriormente, é apresentada a forma de pontuação e quantificação adotada pela presente tese para fornecer o resultado final – potencial de aproveitamento da ventilação natural para o favorecimento da QIA e CTP no Estudo Preliminar de Projeto. Por fim, são abordados os procedimentos técnicos para tornar o DVN uma ferramenta on-line, de acesso público – ou seja: o procedimento de criação e programação da ferramenta.

CAPÍTULO 4

Desenvolvimento do Diagrama
de Ventilação Natural



OBJETIVOS DO CAPÍTULO 4

O objetivo geral deste capítulo é apresentar o desenvolvimento do Diagrama de Ventilação Natural. Assim, serão apresentadas as etapas e procedimentos que resultaram na ferramenta de análise do potencial de aproveitamento da ventilação natural na etapa de estudo preliminar do projeto arquitetônico. São objetivos específicos desse capítulo:

1. Descrição da organização – em Categorias, Itens e Variáveis –, dos Fatores Internos e Externos de Projeto (identificados no Capítulo 1) e dos Parâmetros Legais de Projeto (identificados no Capítulo 2) utilizados no Diagrama de Ventilação Natural.
2. Descrição do procedimento de pontuação, pesos e alertas para cada variável do Diagrama de Ventilação Natural.
3. Descrição do processo de programação e construção da ferramenta on-line.

O presente capítulo segue a estrutura apresentada na Figura 4. 1

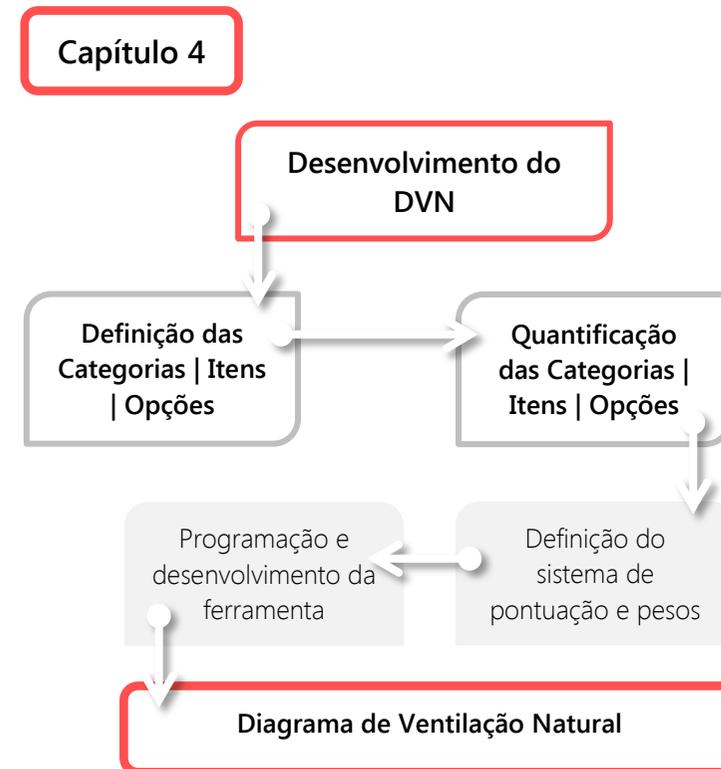


Figura 4. 1 Estrutura que compõe o Capítulo 4



INTRODUÇÃO

Após a definição dos Fatores Internos e Externos de Projeto, dos Parâmetros Legais, e do tipo de modelo mais adequado para a ferramenta de análise proposta na presente tese, aborda-se o processo de desenvolvimento do Diagrama de Ventilação Natural (DVN). De início, foi adotado como base para o DNV o modelo gráfico direto, abordado por Jordan (1998) e descrito no capítulo anterior. Ou seja, as variáveis que irão compor o DVN são, a princípio, independentes entre si. Por exemplo, o resultado “R” depende das variáveis: tamanho da janela “TJ”, Vegetação “Ve”, e velocidade do vento “VV”. No entanto, “TJ” independe de “Ve”, assim como “Ve” independe de “VV”. Para algumas variáveis que são intrinsecamente dependentes, como é o caso de “VV” em relação à “Ve”, foi utilizado um sistema de pontuação que visa considerar a influência de grandes massas de vegetação sobre a velocidade do vento no local (sistema descrito nos tópicos seguintes).

Além disso, a forma de aplicação do modelo foi definida como sendo destinada ao Diagnóstico, Controle e Otimização; na qual a combinação de diferentes variáveis ocasiona diferentes possibilidades de resultados. Ou seja,

utilizando o mesmo exemplo citado anteriormente, a combinação de diferentes valores de “TJ”, “Ve”, e “VV”, podem gerar os resultados “R-bom”, “R-médio”, e “R-ruim”.

Com relação à forma de expressão das variáveis, foi adotado o sistema hierárquico de “Categorias” – “Itens” – “Variáveis”. Nesse sistema, as “Categorias” são apresentadas em formato de “Camadas” (em tópicos) e representam diferentes escalas que influenciam o potencial de aproveitamento da ventilação natural no projeto:

- Categoria 1 – Características do Entorno;
- Categoria 2 – Características do Projeto;
- Categoria 3 – Características do Ambiente.

Os “Itens” são apresentados em formato de “Subcamada” e representam, direta e indiretamente, os Fatores Internos e Externos de Projeto e os Parâmetros Legais relacionados ao potencial de aproveitamento da ventilação natural para o favorecimento da QIA e do CTP – aplicáveis a esta etapa de desenvolvimento do DVN:



- Categoria 1 – Características do Entorno;
 - Item 1.1 – Cidade na qual o projeto será inserido
 - Item 1.2 – Tipo de entorno no qual o projeto será inserido
 - Item 1.3 – Altura média das edificações próximas ao projeto
 - Item 1.4 – Densidade de ocupação do entorno
 - Item 1.5 – Tipo de vegetação presente no entorno
 - Item 1.6 – Existência de atividades prejudiciais à qualidade do ar
- Categoria 2 – Características do Projeto;
 - Item 2.1 – Dimensões de altura e afastamentos do projeto em relação ao entorno
 - Item 2.2 – Orientação das fachadas do projeto
- Categoria 3 – Características do Ambiente.
 - Item 3.1 – Tipo de ambiente a ser analisado
 - Item 3.2 – Dimensões do ambiente (largura, profundidade e altura)
 - Item 3.3 – Distribuição das janelas no ambiente
 - Item 3.4 – Altura da janela em relação ao piso do ambiente e a função de cada abertura no recinto que você deseja analisar

- Item 3.5 – Tamanho das janelas (abertura efetiva)

As “Variáveis” são apresentadas em formato de “infográfico” e representam opções de cada fator externo e interno e cada parâmetro legal utilizado no DVN. Assim, as “Variáveis” de cada “Item” por “Categoria” são:

- Categoria 1 – Características do Entorno;
 - Item 1.1 – Cidade na qual o projeto será inserido
 - Belém
 - Brasília
 - Curitiba
 - Goiânia
 - São Paulo
 - Teresina
 - Item 1.2 – Tipo de entorno no qual o projeto será inserido
 - Entorno Rural
 - Entorno Semiurbano
 - Entorno Urbano



- Item 1.3 – Altura média das edificações próximas ao projeto
 - Edifícios com até 2 pavimentos
 - Edifícios entre 3 e 6 pavimentos
 - Edifícios com mais de 6 pavimentos
- Item 1.4 – Densidade de ocupação do entorno
 - Entorno pouco denso
 - Entorno denso
 - Entorno muito denso
- Item 1.5 – Tipo de vegetação presente no entorno
 - Entorno sem vegetação
 - Entorno com vegetação de pequeno, médio e grande porte
 - Entorno com vegetação densa e de grande porte
- Item 1.6 – Existência de atividades prejudiciais à qualidade do ar
 - Indústrias (com emissão de gases)
 - Aterros Sanitários
 - Estações de tratamento de esgoto
 - Estradas ou lotes não pavimentados (superfícies de terra)
 - Nenhuma das anteriores

- Categoria 2 – Características do Projeto;

- Item 2.1 – Dimensões de altura e afastamentos do projeto em relação ao entorno
 - Altura estimada do projeto
 - Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral esquerda)
 - Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral direita)
 - Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (fundos)
 - Não existem edificações no entorno
- Item 2.2 – Orientação das fachadas do projeto
 - Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Leste – Oeste
 - Planta quadrada ou circular
 - Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Norte – Sul
 - Nenhuma das anteriores

- Categoria 3 – Características do Ambiente.

- Item 3.1 – Tipo de ambiente a ser analisado
 - Quarto



- Sala
- Cozinha
- Banheiro
- Item 3.2 – Dimensões do ambiente (largura, profundidade e altura)
 - Largura
 - Profundidade
 - Pé-direito
- Item 3.3 – Distribuição das janelas no ambiente
 - Janela distribuída em apenas uma parede
 - Janelas distribuídas em duas paredes (perpendiculares entre si)
 - Janelas distribuídas em duas paredes (paralelas entre si)
 - Ambiente sem janela
- Item 3.4 – Altura da janela em relação ao piso do ambiente e a função de cada abertura no recinto que você deseja analisar
 - Janela baixa (entrada de ar / saída de ar)
 - Janela média (entrada de ar / saída de ar)
 - Janela alta (entrada de ar / saída de ar)

- Item 3.5 – Tamanho das janelas (abertura efetiva)
 - Entrada de ar
 - Saída de ar

As dificuldades relacionadas à atribuição quantitativa e qualitativa dos modelos gráficos, abordada no capítulo 3, foram solucionadas por meio de um sistema de pontos e pesos. Ou seja, para cada variável dos itens descritos foi atribuída uma pontuação (de -1 ponto, 0 ponto, ou +1 ponto) e um peso (peso 1 e peso 2). A quantificação da pontuação e do peso dessas variáveis foi feita de três formas: quantificação baseada na revisão bibliográfica, quantificação baseada em modelo analítico/empírico, e quantificação baseada em modelo computacional de dinâmica dos fluidos. Essas formas de quantificação serão abordadas mais especificamente nos tópicos seguintes.



4.1. DEFINIÇÃO DA PONTUAÇÃO E PESOS | CATEGORIA 1

4.1.1. Escolha da Cidade na qual o Projeto será Inserido

O item 1.1 do DVN se refere ao primeiro Fator Externo de Projeto identificado no Capítulo 1 da presente tese “Características do Clima”. Assim, para a definição quantitativa das variáveis do item 1.1, foram coletados os dados de intensidade dos ventos nas Normais Climatológicas Brasileiras do INMET (período de 1961 a 1990). Tendo em vista a dificuldade de inserção de todas as capitais brasileiras neste primeiro momento de desenvolvimento da tese, foram escolhidas para a construção inicial do DVN as cidades de: Belém, (ZB 8), Brasília (ZB 4), Curitiba (ZB 1), Goiânia (ZB 6), São Paulo (ZB 3), e Teresina (ZB 7). Como critério de escolha, buscou-se abranger capitais brasileiras localizadas em diferentes regiões/Zonas Bioclimáticas do Brasil. A Tabela 4. 1 apresenta os dados de intensidade do vento para cada cidade escolhida.

Tabela 4. 1– Dados de Intensidade do Vento segundo as NCB/INMET (1961 – 1990) para cada cidade escolhida.

Intensidade do Vento (m/s)	
Belém	1,35
Brasília	2,56
Curitiba	2,27
Goiânia	1,00
São Paulo	1,31
Teresina	1,56

A escolha da cidade, feita pelo usuário do DVN, determina a intensidade do vento que será considerada no cálculo da velocidade de referência a ser utilizada na Equação 4. 1 (aplicada para ambientes ventilados unilateralmente) e Equação 4. 2 (aplicada para ambientes ventilados bilateralmente). Estas equações fornecem o fluxo do ar no recinto “Q” que é utilizado para a estimativa do número de renovações do ar por hora (RAH) – calculado pela Equação 4. 3. Estas equações e procedimentos de cálculo são indicados por Swami e Chadra (1987), para a determinação do número de RAH em edificações ventiladas naturalmente – parâmetro importante tanto para a QIA quanto para o CTP, como abordado no Capítulo 1. Assim, o número de RAH é um dos resultados fornecidos pelo DVN.



Equação 4. 1

$$Q = 0,05. A. V_{ref}$$

Onde:

Q = fluxo de ar (m³/s);

A = Área de abertura efetiva (m²);

Vref = Velocidade de referência no local onde a edificação está inserida (dada pela Equação 4. 4)

Equação 4. 2

$$Q = Ca. V_{ref}. Ae$$

Onde:

Q = fluxo de ar (m³/s);

Ca = coeficiente atual do fluxo (dado pela Equação 4. 5)

Ae = Área de abertura efetiva (m²);

Equação 4. 3

$$RAH = \frac{Q. 3600}{Volume\ do\ recinto}$$

Equação 4. 4

$$V_{ref} = [(10/h)^2 b_r]. [(H/10)^2 b_b]. (a_b/a_r). V_{rh}$$

Onde:

h = altura do mastro de medição da velocidade do vento²⁵;

a_r e b_r = constantes do terreno (dadas pela Tabela 4. 2);

H = altura da abertura/janela em relação ao solo;

a_b e b_b = constantes da edificação em relação ao terreno (dadas pela Tabela 4. 2)

V_{rh} = velocidade do vento medida em "h" (obtido através da Tabela 4. 2)

Equação 4. 5

$$Ca = CQ/(1 + CQ)$$

Onde:

CQ = coeficiente de fluxo calculado pela Equação 4. 7

²⁵ O valor de 10 metros foi adotado como altura do mastro de medição da velocidade do vento nas cidades escolhidas para este primeiro momento de aplicação do DVN. As valor é informado pelo INMET como sendo a altura do mastro metálico no qual os equipamentos de medição são fixados nas Estações Meteorológicas Automáticas espalhadas pelo país (INMET, 2011).



Equação 4. 6

$$Ae = \frac{A_o A_i}{(A2_o A2_i)^{1/2}}$$

Onde:

Ao = área de abertura da saída de ar;

Ai = área de abertura da entrada de ar.

Equação 4. 7

$$CQ = Cd \cdot V_{ref}(\Delta Cp)$$

Onde:

Cd = coeficiente de descarga (constante 0,62);

ΔCp = diferença dos coeficientes de pressão entre as aberturas de entrada e saída de ar²⁶

²⁶ Segundo Allard (2002) a constante 0,8 pode substituir o valor de ΔCp nos casos em que não é possível utilizar medições in loco ou cálculos matemáticos, uma vez que esta constante contempla casos gerais de estudo da pressão exercida pelo vento nas superfícies de edificações.

Tabela 4. 2 - Parâmetros de terreno para as classes de terreno padrão. Fonte: adaptado de Swami e Chandra (1987)

Classes	b	a	Descrição
I	0,20	0,85	Áreas rurais com edificações baixas
II	0,25	0,67	Área urbana
III	0,35	0,47	Centros de grandes cidades

4.1.2. Tipo de Entorno no qual o Projeto será Inserido

O item 1.2 do DVN é composto pelas variáveis: "Entorno Rural", "Entorno Suburbano", e "Entorno Urbano". Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização do tipo de entorno pelo usuário, foram adotadas as seguintes definições²⁷:

- Entorno Rural: caracteriza-se por apresentar poucas, ou nenhuma, obstruções para a ventilação natural. Projetos inseridos em cidades de pequeno porte ou regiões rurais são exemplos desta opção.

²⁷ Estas definições estarão disponíveis ao usuário do DVN para esclarecer possíveis dúvidas.



- Entorno Suburbano: caracteriza-se por apresentar algumas obstruções para a ventilação natural. Projetos inseridos em cidades de médio porte ou em regiões próximas aos grandes centros urbanos são exemplos desta opção
- Entorno Urbano: caracteriza-se por apresentar grandes obstruções para a ventilação natural. Projetos inseridos em cidades de grande porte ou em grandes centros urbanos são exemplos desta opção.

As variáveis do item 1.2 foram escolhidas por dois motivos principais. O primeiro motivo foi a classificação dos parâmetros do terreno (classes apresentadas na Tabela 4. 2) para a inserção das variáveis "br" e "ar" (variáveis "b" e "a" da Tabela 4. 2) na

Equação 4. 4 – que determina a velocidade de referência do ar na abertura. Assim, quando o usuário do DVN informar o tipo de entorno no qual o projeto será inserido, automaticamente estará informando a classe do terreno e seus parâmetros respectivos, como aborda a Tabela 4. 3. As classes de terreno definidos por Swami e Chandra (1987) estão diretamente relacionados com o grau de rugosidade do terreno (aspecto

abordado nos estudos de Oke, 2006 e Romero 2000 - apresentado no Capítulo 1), bem como o efeito da rugosidade na velocidade do vento no local.

Tabela 4. 3 – Opções do DVN e seus respectivos valores conforme a classe do terreno.

Opção do DVN	Classe de Terreno	Parâmetro respectivo de "br" a ser inserido na Equação 4. 4	Parâmetro respectivo de "ar" a ser inserido na Equação 4. 4
A – Entorno Rural	I	0,20	0,85
B – Entorno Suburbano	II	0,25	0,67
C – Entorno Urbano	III	0,35	0,47

O segundo motivo da escolha destas três opções para o item 1.2 do DVN está relacionado com a quantificação do potencial de aproveitamento da ventilação natural no projeto, visando favorecer a QIA e o CTP. Assim, para o DVN optou-se por um sistema de pontuação simples, variando entre:



- -1 ponto: quando a variável selecionada pelo usuário prejudica o aproveitamento da ventilação natural;
- 0 ponto: quando a variável escolhida pelo usuário não prejudica, ou influencia pouco, o aproveitamento da ventilação natural em relação às demais variáveis do item;
- +1 ponto: quando a variável escolhida pelo usuário favorece o aproveitamento da ventilação natural.

Esta pontuação é aplicada de forma particular nos itens que compõe o DVN. Como mencionado anteriormente, sua aplicação possui como base o referencial teórico levantado, a aplicação de modelos empíricos/analíticos, e/ou a aplicação de modelos CFD.

No caso do item 1.2, tendo como base a bibliografia levantada no Capítulo 1, o tipo de entorno no qual o projeto está inserido modifica tanto a concentração de poluentes quanto a temperatura do ar. Em comparação com áreas rurais ou menos urbanizadas, grandes centros urbanos apresentam, de forma geral, uma maior concentração de materiais particulados no ar prejudiciais à saúde humana, além de uma temperatura do ar mais elevada devido aos efeitos das ilhas de calor urbanas e ao

calor antrópico decorrente de diversas atividades. Assim, a pontuação do item 1.2. foi determinada conforme apresenta a Tabela 4. 4.

Tabela 4. 4 – Pontuação do item 1.2 para cada variável.

Opções do Item 1.1	Pontuação
A – Entorno Rural	+1
B – Entorno Suburbano	0
C – Entorno Urbano	-1

No DVN também foi adotado um “sistema de alerta” para orientar o usuário sobre qual item ou itens estão sendo significativamente impactantes no aproveitamento da ventilação natural. Esses impactos podem estar relacionados, por exemplo, à qualidade externa do ar, à intensificação do ruído aéreo nos ambientes com a abertura das janelas, ao tamanho e posicionamento das aberturas, ao cumprimento dos percentuais mínimos de abertura exigidos pela legislação, etc. Esse sistema também possibilita ao projetista especificar soluções para solucionar ou amenizar as variáveis impactantes, sendo informado, nos resultados finais, quais itens são prejudiciais para o projeto e quais seriam as medidas a serem adotadas.



Para o item 1.2, o sistema de alerta será acionado quando o usuário marcar a opção “C – Entorno urbano”. Assim, no resultado final do DVN irá surgir o seguinte alerta:

- Alerta da opção “C” do item 1.2: Devido às características do entorno, problemas relacionados ao ruído aéreo (ex.: tráfego de automóveis, atividades desenvolvidas em grandes centros urbanos) e a qualidade do ar (ex.: concentração de CO e CO₂) podem dificultar o aproveitamento da ventilação natural.
- **Diretrizes de Projeto**: aumentar o número de renovações do ar nos ambientes (durante o dia) e especificar sistemas de vedações verticais e horizontais que favoreçam o isolamento sonoro durante a noite. Dependendo do caso, um sistema de climatização artificial será necessário durante a noite.

4.1.3. Altura Média das Edificações Próximas ao Projeto

O item 1.3 do DVN é composto pelas variáveis: “Edificações de até 2 pavimentos”, “Edificações entre 3 e 6 pavimentos”, e “Edificações com mais de 6 pavimentos”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização do tipo de entorno pelo usuário, foram adotadas as seguintes definições:

- Edificações de até 2 pavimentos: Marque esta opção caso as edificações vizinhas ao seu projeto possuam, em média, entre 1 a 2 pavimentos.
- Edificações entre 3 e 6 pavimentos: Marque esta opção caso as edificações vizinhas ao seu projeto possuam, em média, entre 3 a 6 pavimentos.
- Edificações com mais de 6 pavimentos: Marque esta opção caso as edificações vizinhas ao seu projeto possuam, em média, mais de 6 pavimentos.



Este item está diretamente relacionado com os Fatores Externos de Projeto identificados em termos da consideração da presença de obstruções do fluxo de ar no entorno do projeto. Como abordado no Capítulo 1, a altura dos elementos construídos está diretamente relacionada à formação de sombras de vento – áreas imediatamente posteriores ao elemento de obstrução nas quais a velocidade do vento é fortemente reduzida.

A determinação das três variáveis do item 1.3 considerou dois aspectos importantes: a necessidade de um número reduzido de variáveis e os resultados das simulações computacionais de cenários de análise. Ou seja, primeiramente buscou-se ajustar o número de variáveis do DVN, visando proporcionar ao usuário uma análise rápida e dinâmica do projeto. Assim, foi fixado, para este item, o número máximo de três variáveis. Note-se que poderia ter sido disponibilizado um número maior de variáveis (ex.: 20 variáveis considerando a diferença de 1 pavimento entre as variáveis para a análise de edificações com até 20 pavimentos), no entanto, optou-se por fixar três variações que abrangem um número maior de casos.

Para a identificação das três variáveis com maior representatividade nos resultados finais do DVN foram feitas

simulações computacionais em um modelo de dinâmica dos fluidos (programa ANSYS[®] CFX). Desse modo, foram elaborados dez modelos representando dez cenários, em que a altura dos elementos construídos vizinhos ao projeto foi sendo variada de 1 pavimento (3 metros) até 10 pavimentos (30 metros). Foram utilizados os dados da velocidade de escoamento do fluxo de ar conforme cada uma das 6 cidades disponíveis no DVN²⁸.

Tendo a velocidade do fluxo de ar fixada para cada cidade, observou-se que a variação de altura dos elementos é proporcional ao tamanho da sombra de vento formada. Assim, optou-se pela aglutinação dos cenários identificados como favoráveis ao aproveitamento da ventilação natural (sombra de vento pouco impactante) – cenários 1 e 2 – na variável “A”. O mesmo processo de aglutinação de resultados foi feito para os cenários 3, 4, 5 e 6 – na variável “B” – os quais apresentaram uma sombra de vento “impactante” na redução do potencial de aproveitamento da ventilação natural. Por fim, os cenários 7, 8, 9 e 10 foram aglutinados na variável “C” – representando uma formação de sombra de vento com “influência muito impactante”

²⁸ As informações relativas aos cenários simulados e seus respectivos resultados estão no Apêndice I.



para o aproveitamento da ventilação natural. Assim, a pontuação do item 1.3 foi determinada conforme apresenta a Tabela 4. 5.

Tabela 4. 5 – Pontuação do item 1.3 para cada variável.

Opções do Item 1.3	Pontuação
Edificações de até 2 pavimentos	+1
Edificações entre 3 a 6 pavimentos	0
Edificações com mais de 6 pavimentos	-1

4.1.4. Densidade do Entorno do Projeto

O item 1.4 do DVN é composto pelas variáveis: “Entorno pouco denso”, “Entorno denso”, e “Entorno muito denso”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização do tipo de entorno pelo usuário, foram adotadas as seguintes definições:

- Entorno pouco denso: Marque esta opção caso os lotes vizinhos ao projeto que você deseja analisar estejam desocupados, não existam lotes a serem ocupados, ou estejam ocupados de forma pontual.

- Entorno denso: Marque esta opção caso existam poucos lotes vizinhos livres no entorno do projeto que você deseja analisar.
- Entorno muito denso: Marque esta opção caso os lotes vizinhos ao projeto que você deseja analisar estejam totalmente ocupados.

Este item está diretamente relacionado aos Fatores Externos de Projeto identificados no Capítulo 1, e consiste na proporção de área ocupada pelos volumes construídos vizinhos em relação ao projeto a ser analisado. Diferentemente do item 1.2 (que se refere a uma escala maior), pretende-se analisar um trecho mais próximo ao lote no qual o projeto será inserido.

A densidade de ocupação, nos termos da Equação 1.1 apresentada no Capítulo 1, está diretamente relacionada com a formação de sombras de vento, com a redução da velocidade e o aumento da sua temperatura do ar que chega até a área de interesse. Quanto maior a densidade de ocupação maior será a presença superfícies que armazenam calor e aquecem o ar em suas proximidades, e maior será a presença de elementos de obstrução do vento - reduzindo as áreas de fluxo livre do ar. Para potencial de aproveitamento da ventilação natural, o aumento da



densidade de ocupação é um aspecto prejudicial – tanto em termos de QIA quanto em termos de CTP.

A quantificação da pontuação das variáveis do item 1.4 foi feita por meio da simulação de cenários, considerando um volume de referência (sólido com dimensões de 1x1x3 metros) posicionado no centro de uma área de 11 x 11 m². Sólidos representando a densidade de ocupação do entorno foram posicionados ao redor do volume de interesse, possuindo altura fixa (3 m) e área de base variável dependendo do cenário. Foram elaborados 4 cenários com as seguintes densidades de ocupação²⁹: 0 – sem edificação no entorno; 0,07; 0,27; 0,60 – conforme apresentado no Apêndice I.

Os resultados dos modelos indicaram a pouca interferência das densidades de ocupação “0” e “0,07” sobre a velocidade do ar incidente sobre a área de interesse. A densidade de ocupação de “0,27” foi caracterizada como um resultado intermediário – em que foi possível observar interferência, a qual, todavia, foi menor em comparação à densidade “0,60”.

Por meio do cruzamento dos cenários simulados no item 1.3 e 1.4, foi determinado o “peso 2” para a opção “A” do

item 1.4 - no caso de o usuário também marcar a opção “A” no item 1.3 -, e para a opção “C”, no caso de o usuário ter marcado a opção “C” do item 1.3. Assim, a pontuação do item 1.4 foi determinada conforme apresenta a Tabela 4. 6. As informações relativas aos cruzamentos dos cenários e seus respectivos resultados estão no Apêndice I.

Tabela 4. 6 - Pontuação do item 1.4 para cada variável

Opções do Item 1.4	Pontuação	Peso
A – Entorno pouco denso	+1	2 (se o usuário marcou a opção “A” no item 1.3)
B – Entorno denso	0	
C – Entorno muito denso	-1	2 (se o usuário marcou a opção “C” no item 1.3)

Para o item 1.4, o sistema de alerta será acionado quando o usuário marcar a opção “C – Entorno muito denso”. Assim, no resultado final do DVN irá surgir o seguinte alerta:

- Alerta da opção “C” do item 1.4: Devido às características do entorno, a obstrução do fluxo de ar pode dificultar o aproveitamento da ventilação natural.

²⁹ Densidades de Ocupação calculadas conforme Equação 1. 1



- **Diretrizes de Projeto:** busque elevar a edificação do solo por meio de palafitas (pilotis) e utilizar maiores afastamentos nas fachadas onde as aberturas voltadas para as orientações predominantes do vento estão posicionadas. Elementos de captação do vento também representam uma boa alternativa.

4.1.5. Tipo de Vegetação Presente no Entorno do Projeto

O item 1.5 do DVN é composto pelas variáveis: “Entorno sem vegetação”, “Entorno com vegetação de pequeno, médio e grande porte”, e “Entorno com vegetação densa e de grande porte”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização do tipo de entorno pelo usuário, foram adotadas as seguintes definições:

- Entorno sem vegetação: Marque esta opção caso os lotes ou áreas vizinhas ao projeto que você deseja analisar não possuam vegetação significativa ou possuam apenas trechos com gramados.

- Entorno com vegetação de pequeno, médio e grande porte: Marque esta opção caso os lotes ou áreas vizinhas ao projeto que você deseja analisar possuam gramados e árvores de pequeno, médio e grande porte.
- Entorno com vegetação densa e de grande porte: Marque esta opção caso os lotes ou áreas vizinhas ao projeto que você deseja analisar possuam vegetação densa de grande porte (Ex.: bosques ou áreas de mata densa)

O item 1.5 do DVN se refere à análise da influência da vegetação sobre os aspectos de qualidade, velocidade e temperatura externa do ar. Assim, como abordado no Capítulo 1, a presença de vegetação contribui para a filtragem dos materiais particulados em suspensão no ar, e contribui para redução da sua temperatura e umidificação. Portanto, a ausência de vegetação contribui para uma maior concentração de poluentes no ar, além da elevação da sua temperatura – devido maior exposição do solo à incidência de radiação solar. Por outro lado, densas massas de vegetação ocasionam a redução considerável da velocidade



do fluxo de ar – aspectos que interferem negativamente para CTP.

Considerando esses, a quantificação das variáveis deste item seguiu o referencial bibliográfico levantado e o sistema de pontuação estabelecido para o DVN. Assim, a pontuação do item 1.5 foi determinada conforme a Tabela 4. 7.

Tabela 4. 7 – Pontuação do item 1.5 para cada variável

Opções do Item 1.5	Pontuação
A - Entorno sem vegetação	-1
B - Entorno com vegetação de pequeno, médio e grande porte	+1
C - Entorno com vegetação densa e de grande porte	0

Para o item 1.5, o sistema de alerta será acionado quando o usuário marcar a opção “A – Entorno sem vegetação”. Assim, no resultado final do DVN irá surgir o seguinte alerta:

- Alerta da opção “A” do item 1.5: Devido ao entorno não possuir vegetação, a qualidade e temperatura do ar que entrará na edificação poderão ser prejudicados.
- **Diretrizes de Projeto**: No paisagismo do projeto, busque inserir tipos de vegetação que reduzam a suspensão de poeira (grama) e proporcionem sombra para a edificação e para o terreno.

4.1.6. Existência de Atividades Prejudiciais à Qualidade do Ar

O item 1.6 do DVN é composto pelas variáveis: “Indústria com emissão de gases”, “Aterros sanitários”, “Estações de tratamento de esgoto”; “Estradas ou lotes não pavimentados (superfícies de terra)”, e “Nenhuma das anteriores”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização do tipo de entorno pelo usuário, foi adotada uma definição geral para as opções “A”, “B”, “C”, e “D” deste item:

- Texto geral para as opções A, B, C e D: Marque esta opção caso exista fonte de emissão de poluentes do ar em



uma área próxima ao projeto que você está analisando. Para isso, busque identificar a presença dessa fonte de poluentes em um raio de 5 km (para indústrias, aterros sanitários, e estações de tratamento de esgoto) ou de 100 metros (para estradas ou lotes não pavimentados), em relação ao lote do projeto.

O item 1.6 se refere ao ultimo fator externo de projeto a ser analisado no DVN. Como identificado no Capítulo 1, determinadas atividades exercidas no entorno de áreas habitadas podem comprometer a qualidade do ar – em decorrência do lançamento de agentes nocivos à saúde humana, materiais particulados, e odores. Para a análise do DVN foram escolhidas atividades variadas, além da existência de áreas não pavimentadas que apresentam superfícies de terra expostas.

O raio de análise da presença das atividades foi determinado com base em resoluções do CONAMA (RE N° 404 de 2008) e estudos diversos de impactos ambientais referentes às atividades mencionadas. É importante ressaltar que não existe uma referência única para estabelecer o raio de influencia das atividades abordadas pelo item 1.6 – tendo em vista que o mesmo segue legislações locais. Dessa forma, para as opções “A”,

“B”, e “C” foi adotado o raio de análise de 5 km em relação ao projeto – valor que mais se aproxima da referência levantada. Já para a opção “D”, foi adotado o valor de 100 metros, buscando caracterizar a presença de uma possível fonte poluidora no entorno do projeto – e tendo em vista a ausência de referência que estabelecesse outro valor.

Para a quantificação deste item foi utilizado o referencial bibliográfico levantado que faz referência à presença ou não das atividades/fontes geradoras de poluentes. Dada a importante contribuição dessa variável para a QIA nos recintos do projeto, foi atribuído o peso 2 negativo para as opções “A”, “B”, “C” e “D”. Assim, a Tabela 4. 8 apresenta a pontuação e o peso dado para o item 1.6.



Tabela 4. 8 - Pontuação do item 1.5 para cada variável.

Opções do Item 1.6	Pontuação	Peso
A – Indústria com emissão de gases	-1	2
B – Aterros sanitários	-1	2
C – Estação de tratamento de esgoto	-1	2
D – Estradas ou lotes não pavimentados	-1	2
E – Nenhuma das anteriores	+1	1

Para o item 1.6, o sistema de alerta será acionado quando o usuário marcar qualquer uma das opções “A”, “B”, “C” ou “D”. Assim, no resultado final do DVN irá surgir o seguinte alerta:

- Alerta das opções “A”, “B”, “C” ou “D” do item 1.6: Devido à presença de atividades geradoras de poluentes do ar, próximas ao local de implantação do projeto, o potencial da ventilação natural em favorecer a QIA pode ser comprometido.
- **Diretrizes de Projeto:** nos ambientes de permanência prolongada, considere a utilização de sistemas de condicionamento artificial que possuam filtros de limpeza do ar.

4.2. DEFINIÇÃO DA PONTUAÇÃO E PESOS | CATEGORIA 2

4.2.1. Dimensões de Altura e Afastamento do Projeto em Relação às Edificações Vizinhas

O item 2.1 possui como variáveis: “Altura estimada do projeto”, “Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral esquerda)”, “Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral direita)”, “Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (fundos)”, e “Não existem edificações vizinhas”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização, por parte do usuário, das edificações vizinhas ao projeto, foram adotadas as seguintes definições:

- Altura estimada do projeto: Nesta opção, insira a altura estimada (em metros) do projeto que você deseja analisar, Considere a distância da cumeeira do telhado até o solo.
- Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral esquerda): Nesta opção, insira a distância (em



metros) do afastamento lateral em relação ao lote posicionado à direita do seu projeto.

- Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral direita): Nesta opção, insira a distância (em metros) do afastamento lateral em relação ao lote posicionado à esquerda do seu projeto.
- Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (fundos): Nesta opção, insira a distância (em metros) do afastamento em relação ao lote posicionado nos fundos do seu projeto.
- Não existem edificações vizinhas: Marque esta opção caso não existem edificações construídas nos lotes vizinhos ao projeto que você está analisando

As variáveis do item 2.1 se referem à relação W/H ótima (relação entre a altura do edifício e o afastamento em relação ao edifício vizinho) abordada ainda dentro dos Fatores Externos ao Projeto – no levantamento bibliográfico do Capítulo

1. O seja, segundo os autores levantados, uma relação W/H ideal deve resultar em um valor entre 1 e 3. Ou seja, um afastamento igual à altura do projeto ou até três vezes maior. Para o desenvolvimento do DVN, foi adotado como referência o valor de 1W para a atribuição de pontuação deste item.

Assim, com a inserção dos valores de altura e afastamentos pelo usuário, o DVN irá fornecer o valor da relação W/H para as duas laterais (esquerda e direita) e para os fundos do projeto. Considerando as possíveis dificuldades de obtenção de uma relação W/H ideal, o sistema de pontuação penaliza os projetos que possuem uma relação abaixo de $0,5W$ – não sendo atribuída pontuação para os valores intermediários $\geq 0,5$ e $\leq 0,99$. Caso não existam edificações vizinhas em um dos lotes laterais ou dos fundos, o usuário terá a opção de informar tal fato para DVN – a relação W/H para aquela opção será automaticamente maior que 1. E no caso de o usuário informar a inexistência de edificações vizinhas (opção “E”), também o DVN considerará automaticamente o valor de W maior que 1, para todas as opções. Se o usuário especificar que o projeto possui mais que 6 pavimentos, caixa de seleção presente na opção “A”, o DVN irá considerar o valor de “0”, para o item 2.1, na pontuação



final. Foi adotado este procedimento dada a dificuldade prática de obtenção de uma relação $W/H \geq a 0,5$ nestes casos.

Por fim, se o usuário determinar, no projeto, que os afastamentos laterais e dos fundos atendem a relação $W/H \geq a 1$ – recomendada como ideal – serão somados os 3 pontos referentes às opções “B”, “C” e “D” no resultado final. Essa “bonificação” considera o esforço do projetista em recuar a edificação para amenizar os efeitos das sombras de vento sobre as edificações vizinhas. Assim, a Tabela 4. 9 apresenta a pontuação das variáveis do item 2.1.

Tabela 4. 9 - Pontuação do item 2.1 para cada variável.

Opções do Item 2.1	Pontuação
A - Altura estimada do projeto	0 (Se o usuário especificar “Edificação com mais de 6 pavimentos”)
B – Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral esquerda)	-1 (Se a relação B/A for menor que 0,5)
	0 (Se a relação B/A for $\geq 0,5$ e $\leq 0,99$)
	+1 (Se a relação B/A for ≥ 1)
C - Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral direita)	-1 (Se a relação C/A for menor que 0,5)
	0 (Se a relação C/A for $\geq 0,5$ e $\leq 0,99$)
	+1 (Se a relação C/A for ≥ 1)
D - Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (fundos)	1 (Se a relação D/A for menor que 0,5)
	0 (Se a relação D/A for $\geq 0,5$ e $\leq 0,99$)
	+1 (Se a relação D/A for ≥ 1)
E – Não existem edificações vizinhas	+1

Para o item 2.1, o sistema de alerta será acionado quando o usuário marcar a caixa especificando que o projeto possui mais que 6 pavimentos. Assim, no resultado final do DVN irá surgir o seguinte alerta:



- Alerta da opção “Edificação com mais de 6 pavimentos” do item 2.1 | opção A: Devido à altura do projeto, maior que 6 pavimentos, observe os afastamentos laterais e dos fundos do lote previstos no Código de Obras local.
- **Diretrizes de Projeto:** recomenda-se a elevação da edificação em pilotis e o escalonamento dos pavimentos, visando favorecer o escoamento do fluxo de ar no local e evitar a formação de sombras de vento.

4.2.2. Orientação das Fachadas do Projeto

O item 2.2 possui como variáveis: “Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Leste-Oeste”, “Planta quadrada ou circular”, “Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Norte-Sul”, “Nenhuma das anteriores”, e “Não existem edificações vizinhas”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização, por parte do usuário, do tipo de planta e orientação das fachadas, foram adotadas as seguintes definições:

- Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Leste-Oeste: Marque esta opção caso o projeto que você deseja analisar possua uma característica de forma predominantemente retangular e com as maiores fachadas voltadas para Leste – Oeste. Enquadre nesta opção os casos em que a orientação das maiores fachadas não ultrapasse 45° azimute em direção ao Norte ou ao Sul.
- Planta quadrada ou circular: Marque esta opção caso o projeto que você deseja analisar possua uma forma predominantemente quadrada ou circular.
- Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Norte – Sul: Marque esta opção caso o projeto que você deseja analisar possua uma forma predominantemente retangular e com as maiores fachadas voltadas para Norte – Sul. Enquadre nesta opção os casos em que a orientação das maiores fachadas não ultrapasse 44° azimute em direção ao Leste ou ao Oeste.



- Nenhuma das opções anteriores: Marque esta opção caso a característica da forma do seu projeto não se enquadre em nenhuma das opções anteriores.

O item 2.2 inicia a abordagem dos Fatores Internos de Projeto identificados no Capítulo 1. Esse item considera os efeitos da forma e orientação do projeto no potencial de aproveitamento da ventilação natural. Com relação à forma, o usuário do DVN pode optar para análise de plantas com características predominantemente retangulares, quadradas e circulares. Existindo também a opção “nenhuma das anteriores”, caso o projeto não se enquadre em tais características de forma.

O sistema de pontuação deste item funciona tendo como base a compactidade da forma e a sua posição em relação à orientação da planta. Ou seja, formas menos compactas possuem maior área de fachada exposta ao meio – consequentemente, acarretam em uma planta mais estreita e favorecem o uso de estratégias como a ventilação cruzada. Ao passo que plantas mais compactas acarretam plantas mais profundas – dificultando o posicionamento de uma número maior de aberturas no projeto. Assim, se o usuário do DVN optar por formas menos compactas (retangulares) será acrescido 1 ponto

ao resultado final – não pontuando caso indique que a planta do projeto se enquadre nas formas quadradas ou circulares. Também não será atribuída pontuação caso o usuário indique que a forma do projeto não se enquadra em nenhuma das opções (Tabela 4. 10).

Tabela 4. 10 – Pontuação do item 2.2 para cada variável.

Opções do Item 2.2	Pontuação
A – Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Leste-Oeste	1
B – Planta quadrada ou circular	0
C – Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Norte-Sul.	1
D – Nenhuma das anteriores	0

Para o item 2.2, o sistema de alerta será acionado quando o usuário marcar a opção “A” indicando que o projeto possui uma planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Leste – Oeste. Assim, considerando o excesso de carga térmica sobre as aberturas que porventura forem posicionadas nessa fachada, o seguinte alerta será gerado nos resultados finais:



- Alerta da opção “Planta retangular com as maiores fachadas voltados para Leste – Oeste” do item 2.2 | opção A: Devido à orientação e forma do projeto, uma grande quantidade de carga térmica pode atingir as aberturas para ventilação.
- **Diretrizes de Projeto:** recomenda-se o dimensionamento de proteções solares nas aberturas das fachadas Leste – Oeste.

4.3. DEFINIÇÃO DA PONTUAÇÃO E PESOS | CATEGORIA 3

4.3.1. Tipo de Ambiente a ser Analisado

O item 3.1 possui as seguintes variáveis: “Quarto”, “Sala”, “Cozinha”, e “Banheiro”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização do tipo de ambiente, por parte do usuário, foram adotadas as seguintes definições:

- Quarto: Marque esta opção para analisar ambientes de permanência prolongada com uso de descanso.
- Sala: Marque esta opção para analisar ambientes de permanência prolongada com uso de lazer.
- Cozinha: Marque esta opção para analisar ambientes de permanência transitória com uso destinado à preparação de alimentos.
- Banheiro: Marque esta opção para analisar ambientes de permanência transitória com uso destinado à higiene pessoal.

As variáveis do item 3.1 se referem aos ambientes que o usuário do DVN poderá analisar. Como mencionado no Capítulo 1, estes ambientes apresentam diferentes necessidades com relação à ventilação natural. Cozinhas e banheiros necessitam de uma adequada taxa de renovação de ar, tendo em vista, basicamente, a salubridade do recinto. Quartos e salas, por serem ambientes de permanência prolongada, além de necessitarem de taxas que garantam a salubridade também



devem proporcionar condições para o conforto térmico passivo. Assim, dependendo de qual ambiente o usuário escolha para analisar, as necessidades com relação ao número de RAH irão variar.

O sistema de pontuação deste item funciona com base no RAH. Ou seja, está ligado ao resultado da Equação 4. 3. Se o usuário estiver analisando os ambientes de cozinha ou banheiro o resultado da Equação 4. 3 deverá ser maior que 1 RAH. A rigor, na ausência de uma referência voltada para climas tropicais, foi considerado o dobro do número de renovações que Wargocki *et al.* (2002) considera como o mínimo aceitável para a salubridade do ar em países de clima frio.

Se o usuário estiver analisando ambientes de sala ou quarto o valor da Equação 4. 3 também deverá ser maior que 1 RAH – sendo atribuído peso 2 para o caso de um valor de RAH maior que 100. Taxas acima de 100 renovações de ar por hora são indicadas por Grosso (1997) para favorecer a evapotranspiração humana e, conseqüentemente, o CTP. No entanto, caso o valor da Equação 4. 3 fique abaixo de 1 RAH – para qualquer ambiente analisado – o DVN dará peso 2 negativo para a pontuação.

Tabela 4. 11 - Pontuação do item 3.1 para cada variável.

Opções do Item 3.1	Pontuação
A – Quarto	+ 1 (se o resultado da equação 4.3 for \geq que 1 e < que 100) + 2 (se o resultado da equação 4.3 for \geq a 100) - 2 (se o resultado da equação 4.3 for < que 1)
B – Sala	+ 1 (se o resultado da equação 4.3 for \geq que 1 e < que 100) + 2 (se o resultado da equação 4.3 for \geq a 100) - 2 (se o resultado da equação 4.3 for < que 1)
C – Cozinha.	+ 1 (se o resultado da equação 4.3 for \geq que 1) - 2 (se o resultado da equação 4.3 for < que 1)
D – Banheiro	+ 1 (se o resultado da equação 4.3 for \geq que 1) - 2 (se o resultado da equação 4.3 for < que 1)

Para o item 3.1, o sistema de alerta será acionado quando o resultado do número de RAH for menor que 1 – independentemente do ambiente selecionado pelo usuário. Assim, considerando a baixa taxa de renovação do ar no recinto, aspecto prejudicial à salubridade, o seguinte alerta será gerado nos resultados finais:

- Alerta da opção “Tipo de ambiente a ser analisado pelo usuário” do item 3.1 | para todas as opções: Ambiente insalubre devido à baixa taxa de renovação do ar.
- **Diretrizes de projeto:** Aumente o tamanho das aberturas.



4.3.2. Dimensões do Ambiente a ser Analisado

O item 3.2 possui as seguintes variáveis: “Largura”, “Profundidade”, “Pé-direito”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização das dimensões do ambiente que o usuário pretende analisar, foram adotadas as seguintes definições:

- Largura: Insira a distância entre as paredes perpendiculares e a porta de entrada do ambiente.
- Profundidade: Insira a distância entre as paredes paralelas e a porta de entrada do ambiente.
- Pé-direito: Insira a distância entre o piso e o forro do ambiente. Em casos em que o ambiente não possua forro, considere a menor distância entre o piso do ambiente e a camada interna da cobertura da cobertura do ambiente.

O item 3.2 se refere ao cálculo da área de piso e volume do ambiente a ser analisado. Assim, o preenchimento das

dimensões de largura e profundidade do ambiente possibilita ao DVN identificar se o mesmo cumpre com a área mínima exigida no Código de Obras da cidade identificada no item 1.1. Por exemplo, se o usuário selecionou a cidade de Brasília no item 1.1, e deseja analisar o ambiente de quarto (informado no item 3.1), a relação “Largura” vezes “Profundidade” – campos “A” e “B” do item 3.2 – não poderá ser inferior a 8 m^2 , já que essa é a área mínima exigida para este ambiente pelo COE-DF. Essa mesma relação é feita pelo DVN para cada ambiente e cada cidade disponíveis para a análise no DVN. O levantamento das áreas mínimas exigidas pelos CE’s das capitais brasileiras – para os ambientes de quarto, sala, cozinha e banheiro – foi realizado e abordado no Capítulo 2.

Outra função importante do item 3.2 é o cálculo do volume do ambiente. O volume gerado pela inserção dos dados de “Largura”, “Profundidade” e “Pé-direito” é utilizado na Equação 4.3 para o cálculo do número de RAH. O item 3.2 não foi incluído no sistema de pontuação do DVN, uma vez que serve para subsidiar outros itens. No entanto, possui um sistema de alerta que é acionado quando o usuário inserir valor de “Largura” e “Profundidade” que resultem em uma área de piso menor do que o mínimo exigido do COE da cidade. Este alerta é gerado no



próprio item e, caso ocorra, impede que o usuário prossiga sua análise no DVN até a inserção de valor que se adeque à legislação local.

- Alerta do item 3.2 | para todas as opções: Área do ambiente é menor que o valor mínimo exigido pelo Código de Obras.
- **Diretriz de Projeto:** Aumente as dimensões de largura e/ou profundidade do ambiente.

4.3.3. Tipo de Ambiente a ser Analisado

O item 3.3 possui as seguintes variáveis: “Janela distribuída em apenas uma parede”, “Janelas distribuídas em duas paredes perpendiculares entre si”, “Janelas distribuídas em duas paredes paralelas entre si”, e “Ambiente sem janela”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização, por parte do usuário, da distribuição das janelas no ambiente que se pretende analisar foram adotadas as seguintes definições:

- Opção A - Janela distribuída em apenas uma parede: Marque esta opção caso haja apenas uma janela no ambiente.
- Opção B - Janela distribuída em duas paredes perpendiculares entre si: Marque esta opção caso haja duas janelas no ambiente, onde uma janela está posicionado em uma parede perpendicular em relação à outra parede que contém a segunda abertura.
- Opção C - Janela distribuída em duas paredes paralelas entre si: Marque esta opção caso haja duas janelas no ambiente, onde uma janela está posicionada em uma parede paralela em relação à outra parede que contém a segunda abertura.
- Opção D - Ambiente sem janela: Marque esta opção caso não haja janelas no ambiente

O item 3.3 possui duas funções principais. A primeira função é a definição da equação que será utilizada para o cálculo do número de RAH. Quando o usuário informar se o ambiente é ventilado unilateralmente (opção A) ou bilateralmente (opção “B” ou “C”) o DVN irá definir automaticamente se utilizará a Equação



4. 1 ou a Equação 4. 2 para o cálculo do fluxo de ar “Q” – utilizado na Equação 4. 3.

A segunda função do item 3.3 está diretamente relacionada às exigências legais identificadas no Capítulo 2. Ou seja, os códigos de obras e normas fixam a necessidade de aberturas para ventilação em ambientes de permanência prolongada (quartos e salas) e transitória (cozinhas), dessa forma, caso o usuário informe nesse item que o ambiente não possui janelas e anteriormente tenha marcado uma das três primeiras opções do item 3.1 – referente ao ambiente de análise – o DVN impedirá o avanço da análise, informando que para tais ambientes a legislação específica exige abertura.

Com relação ao sistema de pontuação, a Tabela 4. 12 apresenta a pontuação adotada para cada opção do item 3.3. Essa pontuação foi estabelecido com base no levantamento bibliográfico realizado nos capítulos 1 e 2. No caso de o usuário informar que o ambiente é ventilado unilateralmente – considerando que uma abertura é o mínimo que o projeto deve cumprir - não será atribuída pontuação ao resultado final. No caso de o usuário informar que o ambiente é ventilado bilateralmente, por janelas posicionadas em paredes perpendiculares entre si, será atribuído 1 ponto ao resultado final

do DVN. E, caso o usuário informe que o ambiente é ventilado bilateralmente por janelas posicionadas em paredes paralelas entre si, será atribuído peso 2 para o item.

Tabela 4. 12 - Pontuação do item 3.3 para cada variável.

Opções do Item 3.3	Pontuação
A – Janela distribuída em apenas uma parede	0
B – Janela distribuída em duas paredes perpendiculares entre si	1
C – Janela distribuída em duas paredes paralelas entre si.	2
D – Ambiente sem janelas	-

4.3.4. Altura da Janela em Relação ao Piso do Ambiente e a Função de cada Abertura no Recinto

O item 3.4 possui as seguintes variáveis: “Janela baixa (entrada de ar e/ou saída de ar)”, “Janela média (entrada de ar e/ou saída de ar)”, “Janela alta (entrada de ar e/ou saída de ar)”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização, por parte do usuário, da altura e função das



janelas no ambiente que se pretende analisar foram adotadas as seguintes definições:

- Opções A, B e C - Janela baixa (entrada de ar e/ou saída de ar): Insira a altura da base da janela em relação ao piso do ambiente que você está analisando. Depois marque se a abertura é destinada à entrada ou à saída de ar. No caso de ambientes com apenas uma abertura, marque os dois campos, pois a janela irá funcionar como entrada e saída de ar. Para identificar qual janela está designada para a entrada de ar, considere como sendo a entrada de ar a janela voltada para a orientação predominante dos ventos na cidade.
 - Exemplo 1: Em Brasília, em um ambiente que possui uma janela voltada para Leste e outra para Norte, a janela voltada para Leste será a abertura de entrada e a janela voltada para Norte será a abertura de saída – uma vez que a orientação Leste possui maior frequência de ocorrência dos ventos em relação à orientação Norte.
 - Exemplo 2: Em Brasília, em um ambiente que possui uma janela voltada para Sul e outra para Oeste, a janela voltada para Sul será a abertura de entrada e a janela voltada para Oeste será a

abertura de saída – uma vez que a orientação Sul possui maior frequência de ocorrência dos ventos em relação à fachada Oeste.

O item 3.4 está relacionado ao potencial do sistema de aberturas (janelas) em proporcionar a retirada do ar mais aquecido do interior do recinto. Ou seja, quando o usuário informar a altura da janela de entrada e a altura da janela de saída do fluxo de ar, o DVN irá identificar se a combinação é a mais favorável para o conforto térmico. Importante destacar que a revisão bibliográfica sobre o tema, realizada na presente tese, (levou a concluir que) o sistema de aberturas com saídas de ar mais altas do que a entrada de ar é o mais efetivo em termo de favorecimento do conforto térmico por meio da ventilação natural.

Em termos de ventilação cruzada, a combinação de aberturas de entrada de ar com altura média (ex.: peitoril a 0,90 m de altura) e saída de ar com altura elevada (ex.: peitoril a 1,70 m de altura) é a mais favorável. Isso porque aberturas de entrada de ar próximas ao piso (baixas) podem resultar em desconforto, provocando um fluxo de ar próximo aos pés dos usuários, e prejudicar a qualidade do ar no recinto – movimentando



materiais particulados que porventura estejam depositados no piso.

Assim, o sistema de pontuação para o item 3.4 do DVN é baseado na revisão bibliográfica e atribui um ponto, na pontuação final do projeto, caso o usuário informe que irá adotar a configuração de aberturas mais favorável (opção “B” – entrada de ar média e opção “C” – saída de ar alta). Para as demais combinações, o DVN não atribui pontuação ao resultado final nem penaliza o usuário. A Tabela 4. 13 apresenta a pontuação para o item 3.4.

Tabela 4. 13 - Pontuação do item 3.4 para cada variável.

Opções do Item 3.4	Pontuação
A – Janela baixa (entrada de ar e/ou saída de ar)	+1 (se o usuário marcar a opção a “B” o campo de entrada de ar, e a opção “C” o campo de saída de ar)
B – Janela média (entrada de ar e/ou saída de ar)	0 (se o usuário marcar outra combinação qualquer).
C – Janela alta (entrada de ar e/ou saída de ar)	

4.3.5. *Tamanho das Janelas (abertura efetiva)*

O item 3.5 possui as seguintes variáveis: “Área da entrada de ar / altura do beiral em relação ao solo” e “Área de saída de ar”. Para o desenvolvimento do DVN, e buscando uma fácil caracterização, por parte do usuário, da altura e função das janelas no ambiente que se pretende analisar foram adotadas as seguintes definições:

- Opção A - Área da entrada de ar / altura do beiral em relação ao solo: Insira a área (m²) de abertura efetiva da janela designada para a entrada de ar. A área de abertura efetiva é a área vazada da janela quando está aberta – ou seja, desconsiderando caixilhos e os planos de vidro que são fixos. Nesta opção insira a altura da abertura (base da abertura) em relação ao nível do solo – adotando como referência o nível terreno onde o projeto será inserido.
- Opção B – Área da saída de ar: Insira a área (m²) de abertura efetiva da janela designada para a saída de ar. A área de abertura efetiva é a área vazada da janela quando está aberta – ou seja, desconsiderando caixilhos e os planos de vidro que são fixos.



O item 3.5 está diretamente relacionado ao cálculo do número de RAH. Ao preencher somente a opção “A”, nos casos em que o ambiente é ventilado unilateralmente, ou as opções “A” e “B”, nos casos em que o ambiente é ventilado bilateralmente, o usuário estará informando o valor da variável “A” da Equação 4. 1, ou o valor das variáveis A_o e A_i da Equação 4. 2. O item 3.5 não possui sistema de pontuação direta – apenas indiretamente por meio do número de RAH.

Com relação ao sistema de alertas, o item 3.5 considera a cidade escolhida no item 1.1 e identifica automaticamente se o usuário está cumprindo com o percentual mínimo de abertura estabelecido pelos Códigos de Obras da cidade e pela NBR 15.575-4. Ou seja, por meio do levantamento feito no capítulo 2 da presente tese, os valores mínimos de referência, para o percentual de área de abertura em relação à área do piso, foram inseridos no DVN como limites a serem obrigatoriamente atendidos pelo projeto.

Por exemplo, caso o usuário escolha a cidade de Porto Alegre no item 1.1, selecione a opção “A - quarto” ou “B - sala” no item 3.1, e selecione a opção “A – janela distribuída em apenas uma parede” no item 3.3, o valor a ser inserido na opção “A” do item 3.5 não poderá ser menor do que 7% do produto

obtido pela opção “A” vezes a opção “B” do item 3.2. Isso porque 7% é o percentual mínimo de abertura em relação à área do piso estabelecido pela NBR 15.575-4 para a ZB 3 – na qual a cidade de Porto Alegre está inserida – e que cumpre a área mínima de abertura do COE da referida cidade. Caso o produto obtido seja inferior à 7%, o DVN irá gerar o seguinte alerta: “Valor não atende a área mínima de abertura fixada pela norma NBR 15.575-4”. Além disso, o usuário ficará impedido de avançar no DVN até inserir um valor (no item 3.5) que atenda ao mínimo fixado pela norma. Esse procedimento é realizado conforme as especificidades da cidade escolhida no item 1.1.

4.4. DEFINIÇÃO DA PONTUAÇÃO FINAL E RESULTADOS

O resultado final do DVN é formado por três informações. A primeira é a pontuação que resume a análise do potencial da ventilação natural em favorecer a QIA e o CTP no ambiente analisado. Por meio do sistema de pontuação de cada item do DVN o usuário pode alcançar uma pontuação máxima de



10 pontos. Considerando os itens que possuem variações que podem atribuir peso 2 para a pontuação, o usuário pode alcançar a pontuação final de 13 pontos. No entanto, como uma combinação que reúna apenas variáveis positivas pode ser extremamente rara, principalmente na Categoria 1 (Características do Entorno), foi adotada a pontuação máxima de 10 pontos como referência para os demais níveis de gradação do DVN.

Assim, foi adotada uma gradação apresentada na Tabela 4. 14 com intervalos de 2 pontos entre cada nível do potencial de aproveitamento da ventilação natural no ambiente analisado.

A segunda informação fornecida pelo resultado final do DVN é o quadro de “alertas/diretrizes”, o qual está diretamente relacionado ao o sistema de pontuação. Ou seja, quando o DVN informar que o potencial de aproveitamento da ventilação natural no ambiente analisado é, por exemplo, “ruim”, automaticamente é gerado o quadro de alertas referentes aos itens que reduziram o potencial de aproveitamento da ventilação natural e as diretrizes de projeto para solucionar os problemas identificados. A Tabela 4. 15 apresenta os alertas e diretrizes possíveis de serem gerados pelo DVN – dependendo das informações inseridas pelo usuário.

Tabela 4. 14 – Níveis do potencial de aproveitamento da ventilação natural adotados no DVN.

Pontos alcançados	Potencial de aproveitamento da VN no ambiente analisado.
Entre 10 e 9 pontos	Potencial Ótimo
Entre 8 e 7 pontos	Potencial Bom
Entre 6 e 5 pontos	Potencial Razoável
Abaixo de 4 pontos	Potencial Ruim



Tabela 4. 15 – Alertas e diretrizes do DVN dos possíveis itens a serem selecionados pelo usuário.

Item	Alerta	Diretriz de Projeto
1.2 – acionado caso o usuário marque a opção "C"	Devido às características do entorno, problemas relacionados ao ruído aéreo (ex.: tráfego de automóveis, atividades desenvolvidas em grandes centros urbanos) e a qualidade do ar (ex.: concentração de CO e CO ₂) podem dificultar o aproveitamento da ventilação natural.	Aumentar o número de renovações do ar nos ambientes (durante o dia) e especificar sistemas de vedações verticais e horizontais que favoreçam o isolamento sonoro durante a noite. Dependendo do caso, um sistema de climatização artificial será necessário durante a noite.
1.4 – acionado caso o usuário marque a opção "C"	Devido às características do entorno, a obstrução do fluxo de ar pode dificultar o aproveitamento da ventilação natural.	Busque elevar a edificação do solo por meio de palafitas (pilotis) e utilizar maiores afastamentos nas fachadas onde as aberturas voltadas para as orientações predominantes do vento estão posicionadas. Elementos de captação do vento também representam uma boa alternativa
1.5 – acionado caso o usuário marque a opção "A"	Devido ao entorno não possuir vegetação, a qualidade e temperatura do ar que entrará na edificação pode ser prejudicada.	No paisagismo do projeto, busque inserir tipos de vegetação que reduzam a suspensão de poeira (grama) e proporcionem sombra para a edificação e para o terreno.

1.6 – acionado caso o usuário marque a opção "A", "B", "C", ou "D"	Devido a presença de atividades geradoras de poluentes do ar, próximas ao local de implantação do projeto, o potencial da ventilação natural em favorecer a QIA pode ser comprometido.	Nos ambientes de permanência prolongada, considere a utilização de sistemas de condicionamento artificial que possuam filtros de limpeza do ar.
2.1 – acionado caso o usuário marque na opção "A" o campo "Edificação com mais de 6 pavimentos"	Devido à altura do projeto, maior que 6 pavimentos, observe os afastamentos laterais e dos fundos do lote previstos no Código de Obras local	Recomenda-se a elevação da edificação em pilotis e o escalonamento dos pavimentos, visando favorecer o escoamento do fluxo de ar no local e evitar a formação de sombras de vento
2.2 – acionado caso o usuário marque a opção "A"	Devido à orientação e forma do projeto, uma grande quantidade de carga térmica pode atingir as aberturas para ventilação	Recomenda-se o dimensionamento de proteções solares nas aberturas das fachadas Leste – Oeste
3.1 – acionado caso o número de RAH seja inferior à 1	Ambiente insalubre devido à baixa taxa de renovação do ar	Aumente o tamanho das aberturas
3.2 - acionado caso a área de piso do ambiente em análise seja inferior ao mínimo exigido pelo COE local	Área do ambiente é menor que o valor mínimo exigido pelo Código de Obras.	Aumente as dimensões de largura e/ou profundidade do ambiente
3.5 – acionado caso o percentual de abertura do ambiente de permanência prolongada não cumpra o mínimo exigido pela NBR 15.575-4	Valor não atende a área mínima de abertura fixada pela norma NBR 15.575-4	-



A terceira informação fornecida pelo DVN é a estimativa do número de RAH do projeto do ambiente analisado. Por meio da inserção dos dados e escolhas feitas pelo usuário, o DVN informará se o ambiente atende ou não ao número mínimo de renovações de ar para assegurar a salubridade do ambiente (1 RAH), e/ou se atende ao mínimo de renovações de ar para favorecer o conforto térmico (100 RAH).

De posse dessas informações, o usuário do DVN poderá tomar decisões de projeto no sentido de melhorar o desenho da habitação e/ou justificar estratégias adotadas no estudo preliminar – que devem ser desenvolvidas nas posteriores etapas de projeto.

4.5. DEFINIÇÃO DA LINGUAGEM E PROGRAMAÇÃO DO DIAGRAMA DE VENTILAÇÃO NATURAL

Para a transformação das Categorias, Itens e Variáveis do DVN em uma linguagem simples e acessível, buscou-se desenvolver, primeiramente, a estruturação e representação gráfica do DVN. Assim, com o apoio de profissionais da área de design gráfico e tecnologia da informação, o DVN foi estruturado em: Página de Apresentação e Início, Páginas de Preenchimento de Informações, e Página do Resultado Final.

Na página de Apresentação e Início (Figura 4. 2), foram concentradas as informações relativas ao objetivo e breve descrição da ferramenta, um *link* para o usuário ter acesso às informações completas sobre como a ferramenta foi desenvolvida, e o campo de seleção destinado à escolha da cidade na qual o projeto a ser analisado será inserido. Nas Páginas de Preenchimento de Informações (Figura 4. 3), o usuário terá acesso a três páginas referentes às três categorias a serem analisadas pelo DVN. Em cada página o usuário irá encontrar a categoria que está analisando o projeto, e os itens a serem analisados (de preenchimento por parte do usuário). Ao



selecionar o item a ser analisado, o DVN fornecerá as suas variáveis (contendo o campo a ser marcado ou informado pelo usuário, e a explicação/descrição da variável).



Figura 4. 2 – Estruturação da página de Apresentação e Início do DVN. 1 – Introdução e explicação dos objetivos do DVN; 2 – link para informações completas sobre o DVN; 3 – campo de escolha da cidade na qual o projeto a ser analisado será inserido.



Figura 4. 3 – Estrutura das páginas de Preenchimento de Informação. 1 – Categorias de Análise; 2 – Cidade selecionada para a análise do projeto; 3 – Itens de análise da Categoria; 4 – Campo que leva à próxima categoria após o usuário ter preenchido todas as variáveis.

Dentro da Categoria 1 – Características do Entorno – o usuário terá acesso aos cinco Itens, descritos no tópico 4.1. Ao selecionar cada um dos itens, o usuário terá acesso às suas respectivas variáveis. As variáveis foram representadas em ícones de tonalidades distintas – cada tonalidade representa uma categoria. Assim, na Categoria 1, o usuário encontrará os ícones apresentados nas figuras a seguir, com a tonalidade azul.

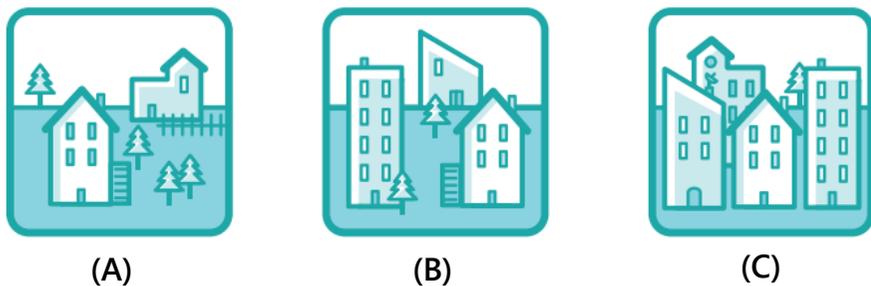


Figura 4. 4 – Variáveis do Item 1.1 | Tipo de Entorno no qual o Projeto será Inserido. (A) Entorno Rural; (B) Entorno Suburbano; (C) Entorno Urbano.

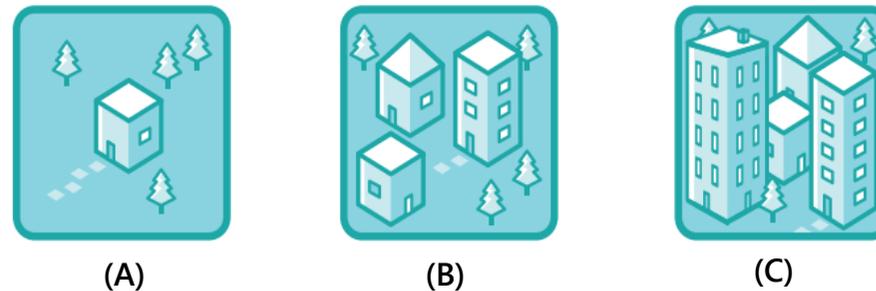


Figura 4. 6 - Variáveis do Item 1.3 | Densidade do Entorno do Projeto. (A) Entorno pouco denso; (B) Entorno denso; (C) Entorno muito denso.

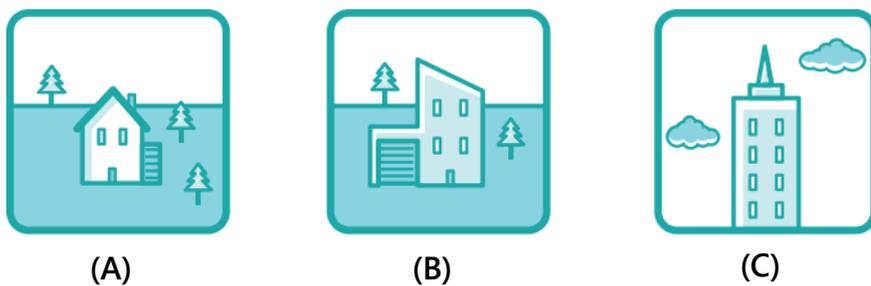


Figura 4. 5 - Variáveis do Item 1.2 | Altura Média das Edificações próximas ao Projeto. (A) Edificações até 2 pavimentos; (B) Edificações entre 3 e 6 pavimentos; (C) Edificações com mais de 6 pavimentos.

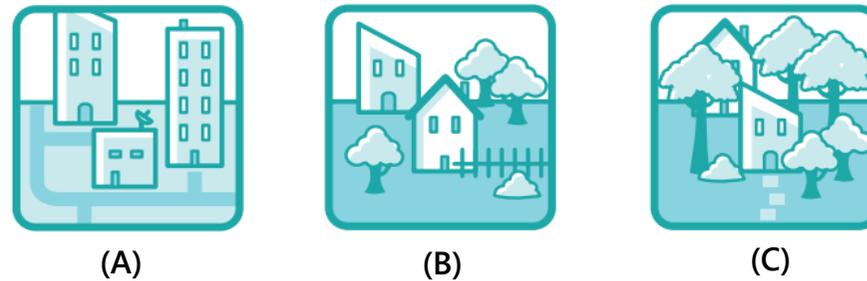


Figura 4. 7 - Variáveis do Item 1.4 | Tipo de Vegetação Presente no Entorno do Projeto. (A) Entorno sem vegetação; (B) Entorno com vegetação de pequeno, médio e grande porte; (C) Entorno com vegetação densa e de grande porte.

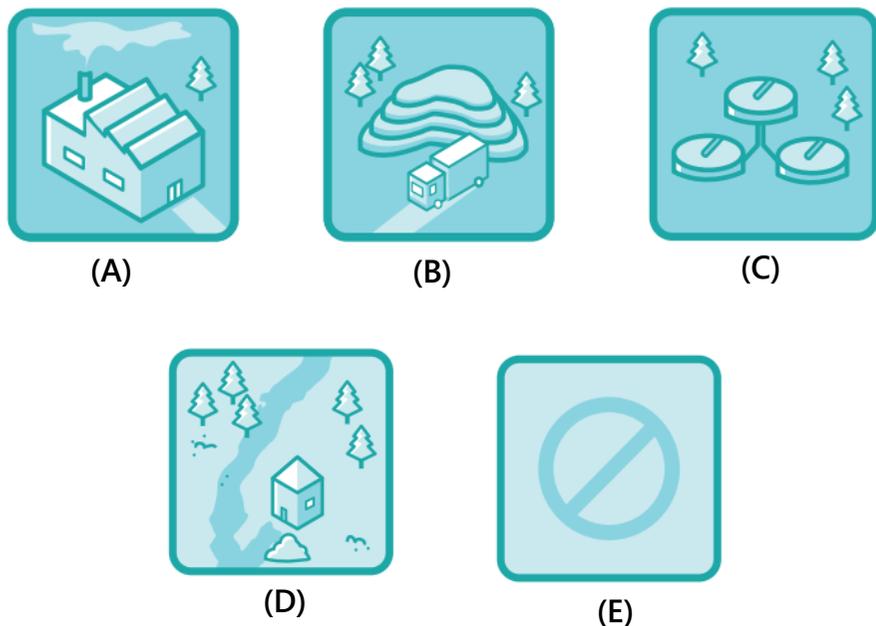


Figura 4. 8 - Variáveis do Item 1.5 | Existência de Atividades Prejudiciais à Qualidade do Ar. (A) Industrias com emissão de gases; (B) Aterros sanitário; (C) Estação de tratamento de esgoto; (D) Estradas ou lotes não pavimentados; (E) nenhuma das anteriores.

Dentro da Categoria 2 – Características do Projeto – o usuário terá acesso aos dois Itens, descritos no tópico 4.2. Ao seleccionar cada um dos itens, o usuário terá acesso às suas respectivas variáveis. Na Categoria 2, o usuário encontrará os

ícones apresentados na Figura 4. 9 e na Figura 4. 10, com a tonalidade verde.

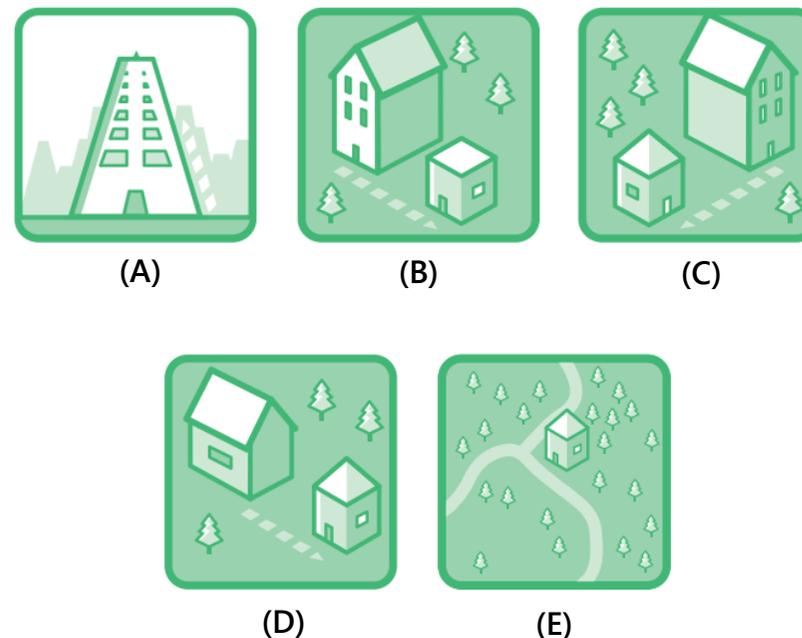


Figura 4. 9 - Variáveis do Item 2.1 | Dimensões do Projeto em Relação às Edificações Vizinhas. (A) Altura estimada do projeto; (B) Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral direita); (C) Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (lateral esquerda); (D) Afastamento do projeto em relação à edificação vizinha (fundos) (E); Não existem edificações vizinhas.

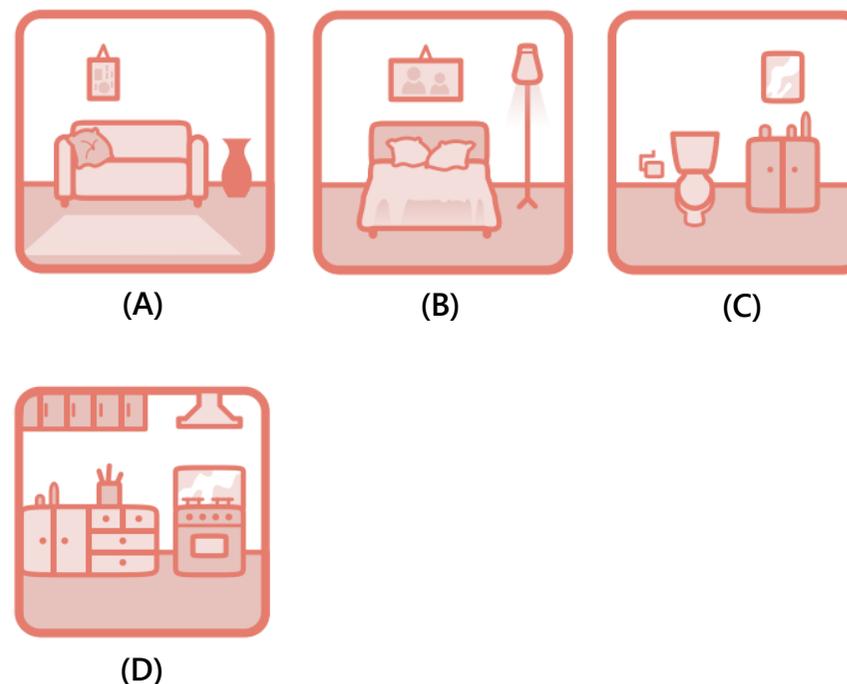
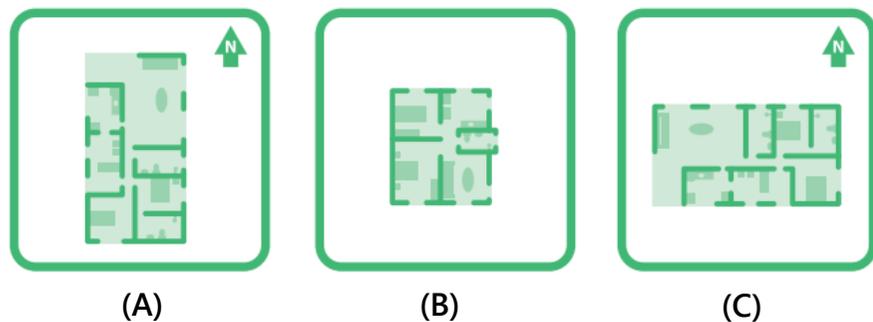


Figura 4. 10 - Variáveis do Item 2.2 | Orientação das Fachadas do Projeto a ser Analisado. (A) Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Leste-Oeste; (B) Planta quadrada ou circular; (C) Planta retangular com as maiores fachadas voltadas para Norte-Sul.

Figura 4. 11 - Variáveis do Item 3.1 | Ambiente a ser Analisado. (A) Sala; (B) Quarto; (C) Banheiro; (D) Cozinha.

Dentro da Categoria 3 – Características do Ambiente – o usuário terá acesso aos cinco Itens, descritos no tópico 4.3. Ao selecionar cada um dos itens, o usuário terá acesso às suas respectivas variáveis. Na Categoria 3, o usuário encontrará os ícones apresentados nas figuras a seguir com a tonalidade vermelha.

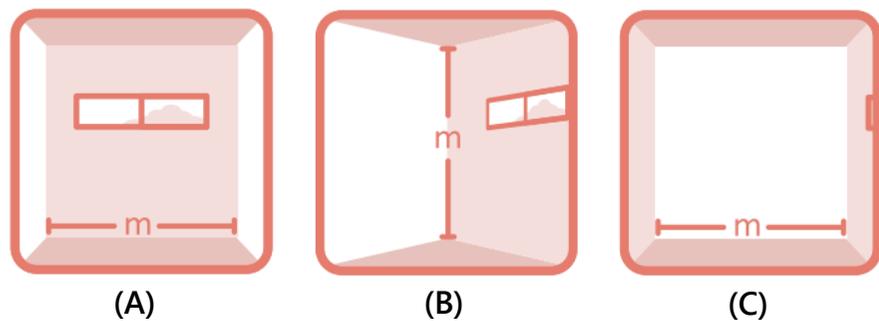


Figura 4. 12 - Variáveis do Item 3.2 | Dimensões do Ambiente a ser Analisado. (A) Largura; (B) Pé-Direito; (C) Profundidade.

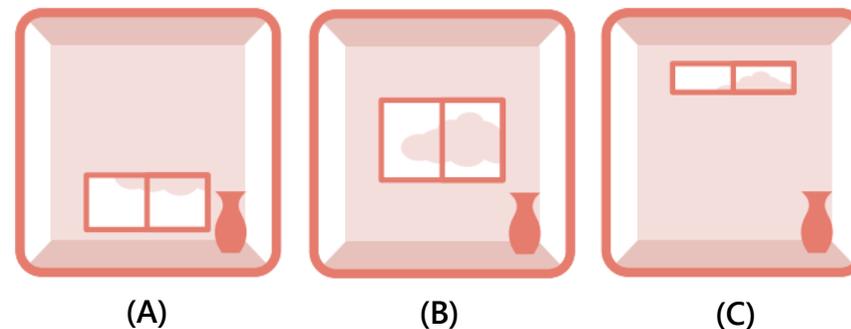


Figura 4. 14 - Variáveis do Item 3.4 | Altura da(s) abertura(s) em relação ao piso e a função de cada abertura. (A) Janela baixa; (B) Janela média; (C) Janela alta.

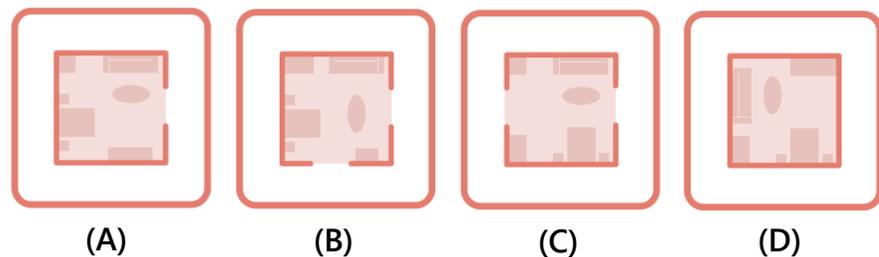


Figura 4. 13 - Variáveis do Item 3.3 | Posicionamento da(s) Janela(s) no Ambiente a ser Analisado. (A) Janela posicionada em uma parede; (B) Janelas posicionadas em duas paredes adjacentes; (C) Janelas posicionadas em duas paredes opostas; (D) Ambiente sem janela.

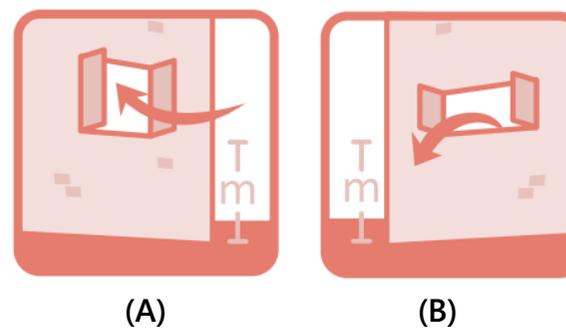


Figura 4. 15 - Variáveis do Item 3.5 | Área de Abertura Efetiva da(s) Janela(s) no Ambiente a ser Analisado e a sua Altura em Relação ao Solo. (A) Área da entrada de ar (e sua altura em relação ao solo); (B) Área da saída de ar (e sua altura em relação ao solo).



Após a inserção de todas as informações, o usuário terá a possibilidade de gerar os resultados. Na Página do Resultado Final, o usuário terá as informações sobre a pontuação do ambiente do projeto analisado e o seu respectivo potencial de aproveitamento da ventilação natural para o favorecimento da QIA e CTP. Também terá acesso ao número de RAH aproximado para o ambiente, os alertas sobre os itens impactantes no potencial de aproveitamento da ventilação natural, e as respectivas sugestões de diretrizes de projeto para minimizar os problemas identificados.

Um *Mind Map* do algoritmo do programa foi desenvolvido para a melhor visualização do funcionamento do DVN (ver Apêndice II). Os detalhes técnicos de programação do sistema que compõe o Diagrama de Ventilação Natural, fornecido pela equipe responsável pelo desenvolvimento digital e página de hospedagem da ferramenta, está apresentado no Apêndice III. O DVN pode ser acessado gratuitamente no endereço: infograficos.webbsb.com.br.

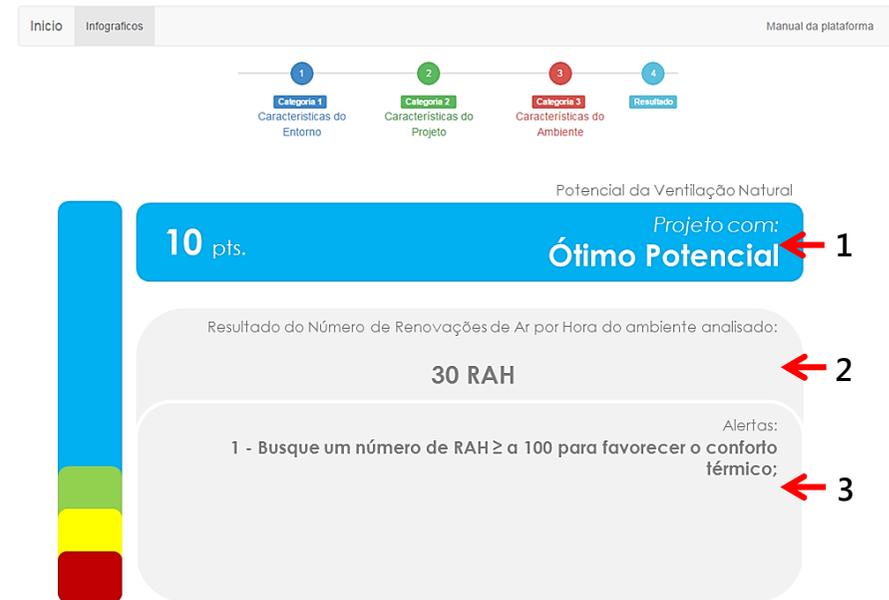
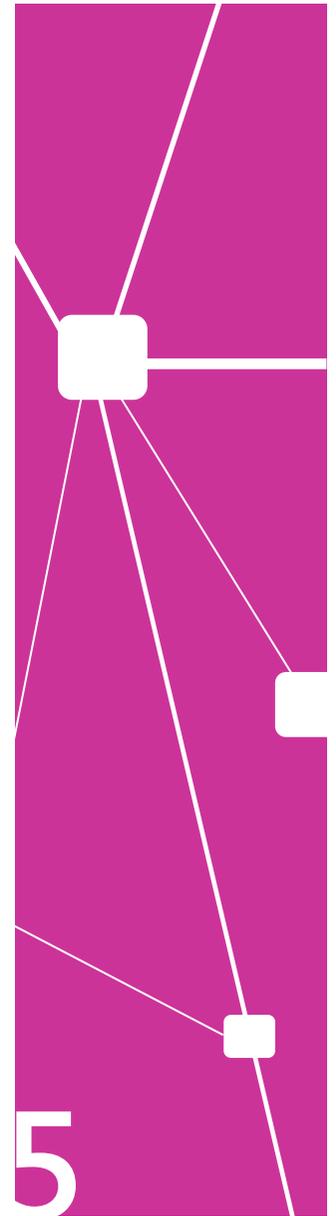


Figura 4. 16 – Estrutura da Página do Resultado Final de análise do ambiente. 1 – pontuação do ambiente e potencial de aproveitamento da ventilação natural; 2 – número de RAH estimado para o ambiente analisado; 3 – campo de possíveis alertas e diretrizes de projeto a serem verificados pelo usuário.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões para
Trabalhos Futuros





CONCLUSÕES GERAIS

Primeiramente, é importante destacar que o processo de transformação, ou tradução, de um fenômeno extremamente caótico como o escoamento do fluxo de ar não é tarefa simples. As variáveis envolvidas que efetivamente influenciam as condições físicas e químicas do fluido abordado (ar) são diversas – assim como são diversas as possibilidades de interação dessas. Assim, quando se deseja simplificar a análise desse fenômeno, é preciso relevar um aspecto importante: a precisão dos resultados.

Dessa forma, é fundamental reforçar o pensamento defendido desde o início pela presente tese de que o Diagrama de Ventilação Natural é uma ferramenta que busca auxiliar o processo de desenvolvimento do Estudo Preliminar de projeto – contribuindo em uma das etapas do processo de desenvolvimento do projeto de arquitetura. Contudo, o DVN não exime ou substitui a aplicação de outros modelos mais precisos – aplicáveis nas etapas posteriores ao Estudo Preliminar. O DVN pode vir a contribuir para a aplicação dos modelos Microscópicos – uma vez que evita o teste/simulação de soluções de projeto ou de condições de entorno prejudiciais à QIA e ao

CTP (possíveis de serem identificadas na etapa de Estudo Preliminar).

Entre os principais pontos positivos da utilização do DVN, pode-se destacar a possibilidade do projetista visualizar os principais fatores benéficos e os principais fatores prejudiciais à QIA e ao CTP durante as primeiras etapas do processo de projeção. Essa visualização permite a tomada de decisões no início do projeto, otimizando o produto final em termos de: tempo e recursos gastos para a conclusão do projeto, eficiência energética da edificação, salubridade dos ambientes, e conforto térmico.

Outro ponto positivo é a estimativa do número de RAH por ambiente analisado, bem como o fornecimento de diretrizes para a melhoria do Estudo Preliminar. Como mencionado ao longo da presente tese, o número de RAH é um aspecto fundamental quando se analisa a eficiência do sistema de ventilação (seja natural ou artificial) em uma edificação. A facilidade de obtenção do número de RAH, estimado por meio da utilização do DVN, torna possível uma análise mais rápida dos fatores relacionados e fornece um maior respaldo ao desenvolvimento do projeto.



Por fim, a linguagem amigável, a facilidade de utilização, o acesso gratuito à ferramenta, e a utilidade prática dos resultados fornecidos atribuem ao DVN um viés que não se restringe somente à atividade profissional do arquiteto – mas também lhe atribui um viés didático que pode ser explorado na formação do profissional dentro da academia.

O Capítulo 1 abordou grande parte do referencial teórico utilizado para o desenvolvimento da tese. A primeira conclusão que se pode extrair do capítulo é a escassez de estudos nacionais que abordem a Qualidade Interna do Ar como uma variável importante do projeto que arquitetura. Todos os estudos nacionais levantados durante os quatro anos de desenvolvimento da tese, relacionados com a QIA, não estavam conectados nem ao projeto de arquitetura e/ou urbanismo nem ao potencial de aproveitamento da ventilação natural.

Importante destacar que existem importantes pesquisas nacionais na área da saúde que evidenciam o problema de qualidade do ar nos grandes centros urbanos. Na área de engenharia mecânica, pesquisas apontam para a baixa qualidade do ar nas edificações – decorrente, principalmente, da falta de manutenção dos sistemas de ar condicionados. No campo da arquitetura são vastas as pesquisas que relacionam o uso

intensivo de ar condicionado com o consumo excessivo de energia elétrica (baixa eficiência energética) – indicando a ventilação natural como solução. No entanto, é necessário unir esses pensamentos no sentido solucionar/amenizar o problema fundamental da QIA no seu cerne: baixa qualidade do projeto arquitetônico.

Ou seja, são necessárias pesquisas que visem identificar como os projetos arquitetônico e urbanístico podem favorecer a QIA nas cidades e no interior das edificações – considerando o expressivo potencial de ventilação natural no Brasil. Haja vista o crescente processo de urbanização do território, o desenvolvimento de tais pesquisas poderia tanto amenizar o problema nos grandes centros urbanos, quanto evitar a sua ocorrência em cidades ainda em desenvolvimento.

Outro ponto importante referente à QIA nas edificações brasileiras é a ausência de estudos para a quantificação do impacto que a baixa qualidade do ar causa em termos econômicos e sociais. A quantificação desses impactos pode tornar a QIA um aspecto mais robusto a ser considerado no projeto arquitetônico, justificando a adoção de diretrizes que, conquanto mais onerosas, aumentem a qualidade do produto final.



Por fim, após a identificação dos fatores externos e internos de projeto – que influenciam a QIA e o CTP – pode-se concluir que quando o meio externo é favorável à utilização da ventilação natural, o seu potencial de aproveitamento depende fundamentalmente do projeto – ou, em outras palavras, das decisões do arquiteto. Dessa forma, sistema de ventilação cruzada, área de abertura efetiva, dimensionamento dos ambientes, distanciamento das aberturas em relação aos elementos de obstrução do entorno, sistemas de captação da ventilação, entre outros, compõem as variáveis que apenas o arquiteto pode interferir na busca do melhor aproveitamento da ventilação natural.

Pode-se inferir, também, a precariedade com que os Códigos de Edificação tratam da ventilação natural. Não existe justificativa técnica plausível para a padronização dos percentuais de abertura em diferentes Zonas Bioclimáticas – assim como não existe justificativa para aleatoriedade das áreas de abertura efetiva nas mesmas Zonas Bioclimáticas. Importante destacar que a presente tese não está afirmando que os percentuais e as áreas mínimas calculadas, com base nos CE's, implicam baixa qualidade do ar ou desconforto térmico nas edificações. Entretanto, visando ao máximo aproveitamento da QIA e do CTP, sugere-se a revisão

dos parâmetros adotados nesses documentos, a fim de que sejam utilizados percentuais e áreas tecnicamente determinadas para cada caso.

Outro ponto importante é o exemplo a ser seguido dos documentos legais – nacionais e internacionais – que caminham no sentido do estabelecimento de parâmetros baseados na performance da edificação. Em termos de ventilação natural, como abordado no capítulo 2, o estabelecimento de um desempenho mínimo e a exigência da sua comprovação são medidas mais adequadas do que a fixação de parâmetros legais descritivos. Nesse sentido, a presente tese conclui que a fixação de uma taxa mínima de ventilação – que pode ser quantificada em renovações de ar por hora – é a melhor forma de postulação dos parâmetros legais nas normas, regulamentos e CE's.

Todavia, para o estabelecimento de parâmetros baseados na performance da edificação, é necessário o desenvolvimento de pesquisas que comprovem a efetividade desses parâmetros – principalmente em termos de QIA. Em termos de CTP, a atual norma brasileira de desempenho (NBR 15.575) fixa temperaturas mínimas e máximas que os ambientes de permanência prolongada devem atender ao longo do ano. Entretanto, não se aprofunda nos efeitos da movimentação do ar



sobre a pele – a qual proporciona a sensação térmica –, aprofundamento esse que poderia ser objeto de pesquisas para a complementação desse aspecto da norma.

Por fim, pode-se concluir que existe uma clara dificuldade de compreensão dos parâmetros legais presentes nos documentos legais levantados; e que essa dificuldade se dá principalmente por dois fatores: a quantidade significativa de documentos que devem ser consultados, e a ausência de exemplos que representem os parâmetros exigidos (exemplos didáticos: figuras, desenhos, esquemas, etc.).

O exemplo do Reino Unido – que reúne em um único lugar (acessível na rede mundial de computadores) todas as informações legais que os profissionais envolvidos no projeto (não somente os arquitetos) necessitam para o cumprimento das normas e regulamentos vigentes, além de disponibilizar uma maquete virtual interativa, na qual se pode selecionar qualquer elemento componente do edifício (dos muros ao sistema hidrossanitário) e ter acesso à legislação referente àquele componente – auxilia o profissional na compreensão e aplicação das exigências legais, influenciando diretamente a otimização do desenvolvimento do projeto. Em vista de tais considerações, o DVN buscou utilizar desse pensamento, inserindo ao longo da

análise das Categorias alguns dos principais parâmetros legais presentes na NBR 15.575 e nos CE's. Espera-se que com o aprimoramento futuro do DVN todos os parâmetros legais de projeto referentes à ventilação natural estejam inseridos na ferramenta – evitando que o profissional tenha de procurar/consultar tais parâmetros nos documentos legais.

A constatação da ausência de ferramentas amigáveis, simples e acessíveis aos profissionais de projeto é a principal conclusão do capítulo. Isso porque, dentre os modelos macroscópicos e microscópicos analisados, verificou-se a dificuldade de aplicação dos modelos analíticos e empíricos (tendo em vista sua linguagem estritamente matemática), a complexidade de aplicação e acesso aos modelos multizona e de zona única, e a inviabilidade técnica e econômica de aplicação dos modelos em escala e CFD (devido ao nível de detalhamento exigido do projeto, e nível de habilidade técnica exigido do usuário).

Assim, tendo em vista as particularidades do Estudo Preliminar de projeto, aferiu-se que uma ferramenta de análise baseada nos modelos gráfico atenderia de forma mais adequada às necessidades do usuário nessa etapa do projeto. Ou seja, mesmo sendo um modelo que não fornece um resultado preciso



e uma qualidade gráfica de apresentação das análises, esse modelo se configura extremamente amigável ao usuário, pois não exige elevada habilidade técnica, possibilita uma análise rápida e possui flexibilidade de alterações de variáveis, além de geralmente ser acessível a todos os profissionais – sendo gratuito e amplamente disseminado.

No entanto, para o desenvolvimento de um modelo gráfico, é necessário um esforço considerável no sentido de quantificação das variáveis e suas possíveis combinações – que, proporcionalmente, geram uma quantidade considerável de resultados possíveis. Deve-se ter a precaução, portanto, de aperfeiçoar esse modelo, tendo em vista seus objetivos principais: rapidez, acessibilidade, simplicidade e caráter amigável ao usuário.

Pode-se mencionar, ainda, a dificuldade de transformação dos fatores externos e internos de projeto, e dos parâmetros legais, em Itens e Variáveis do DVN. A princípio, buscou-se a incorporação de todos os fatores e parâmetros – ideia que foi aos poucos sendo deixada de lado devido à complexidade de quantificação do número de combinações possíveis e, conseqüentemente, do número de possíveis resultados. Além disso, a incorporação de todos os fatores e

parâmetros seria inviável dentro do tempo fixado para o desenvolvimento da presente tese, e tornaria a análise feita pelo usuário um processo longo e complexo – interferindo nos princípios dos modelos gráficos.

Importante destacar que ao longo do processo de desenvolvimento do DVN uma série de ideais e possibilidades de melhorias foram surgindo. Dessa forma, espera-se que à medida que a ferramenta começar a ser testada/aplicada possam ser realizadas as devidas melhorias e otimizações do DVN, dentre as quais estão:

- Hospedagem do DVN em uma página de domínio próprio ou vinculada ao Laboratório de Sustentabilidade Aplicada à Arquitetura e Urbanismo – LaSus da FAU/UnB;
- Melhoria da linguagem visual do DVN (representação gráfica de suas Categorias, Itens e Variáveis);
- Inserção dos dados climáticos e parâmetros legais para possibilitar a análise de todas as capitais brasileiras;
- Inserção de mais itens que possibilitem uma análise mais completa do potencial da ventilação natural (ex.: presença de portas de vidro/varanda, aberturas zenitais, maior variação de formas de planta baixa [em "L", "U", "T"]);



- Geração de resultados que considerem a combinação de todas as variáveis do DNV.

Por fim, ao término da presente tese, pretende-se entrar com a solicitação de patente da ferramenta desenvolvida junto ao INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Esse processo torna-se importante tanto para a Faculdade de Arquitetura da Universidade de Brasília quanto para a viabilização de possíveis financiamentos externos para o aprimoramento do DVN.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base no conteúdo apresentado na presente tese, sugere-se como pontos para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Pesquisas referentes à ventilação natural que abordem a qualidade do ar no espaço urbano, como, por exemplo, o potencial da ventilação natural na dispersão de gases prejudiciais à

saúde humana nos grandes centros urbanos, e a influência da forma urbana sobre a concentração de gases prejudiciais à saúde humana.

- Pesquisas referentes à ventilação natural que abordem a qualidade interna do ar em habitações de interesse social. Como por exemplo: a verificação das condições internas do ar (concentração de poluentes, número de renovações do ar por hora) nesse padrão de construção; e a influência de diferentes condições de renovação do ar sobre a saúde, produtividade e o conforto térmico dos ocupantes deste tipo de edificação.
- Pesquisas ou iniciativas que promovam a melhoria/revisão dos Códigos de Edificações no Brasil – tendo em vista a busca de inserção de uma filosofia baseada na performance da edificação.



- Desenvolvimento de outras ferramentas baseadas nos Modelos Gráficos que auxiliem o desenvolvimento do Estudo Preliminar de projeto – como, por exemplo, uma ferramenta destinada à análise da iluminação natural, aproveitamento de energias renováveis (solar, eólica, biomassa), entre outras.

REFERÊNCIAL TEÓRICO

- ADDINGTON, D. M. The History and Future of Ventilation. *In.*: Indoor Air Quality Handbook. Cap. 2. Spengler J. D.; Samet, J.; McCarthy, J. F. (ed.). McGraw-Hill, 2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÉRIA – ANVISA. Resolução n° 09, de 16 de janeiro de 2003.
- AHMAD, H.; KHARE, M.; CHAUDHRY, K. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections – A review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol93, p. 697-717. 2005
- ALLARD, F.(ed.). Natural Ventilation in Buildings. James & James. London, 2002.
- ALLARD, F.; ALVAREZ, S. Fundamentals of Natural Ventilation. *In.*: Natural Ventilation in Buildings. Allard (ed.). James & James. London, 2002
- ALLARD, F.; GHIAUS, C. Natural Ventilation in the Urban Environment. *In.*: Building Ventilation: the state of the art. Santamouris and Wouters (eds.). Earthscan, London; 2006.
- ARMTTI, J.; COUNIHAN, J. The simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment* vol. 2, pp. 49-62.
- ASHRAE Standard 62.2-2003, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality for Low-Rise Residential Buildings.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 13.531. Elaboração de projetos de edificações – Atividades técnicas: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 13.532: Elaboração de projetos de edificações – Arquitetura. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 16401 – 3. Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 15.220 – 3. Desempenho Térmico de Edificações: Parte 3 – Zoneamento Bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 15.575 – 1. Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 15.575 – 4. Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para sistemas de vedações verticais internas. Rio de Janeiro, 2013.
- AKIBARI, H.; TAHA, H. The Impact of Trees and White Surfaces on Residential Heating and Cooling Energy Use in Four Canadian Cities. *Energy* vol.17, p. 141-149, 1992.
- AWBI, H. 1991. Ventilation of Buildings. E & FN Spon, London, 1991.

- AXLEY, J.. Analytical Methods and Computing Tools for Ventilation. in: Santamouris and Wouters (ed.) Building Ventilation: the state of the art. Cap. 2 (pp. 39 – 106). Earthscan, London, 2006.
- AXLEY, J. Multizone Airflow Modeling in Buildings: History and Theory. Taylor & Francis Group (ed.), HVAC& Research, vol. 13; Issue 6, 2007.
- AYNSLEY, R.; MELBOURNE, W.; VICKERY, B.. Architectural Aerodynamics. Applied Science Publishers. London, 1977.
- AYNSLEY, R.. Natural Ventilation in Passive Design. BEDP Environment Design Guide. Tec 2. May, 2007; (disponível em: <http://www.environmentdesignguide.com.au/media/TEC02.pdf>).
- AZEVEDO, A. Método dos Elementos Finitos. Universidade de Engenharia do Porto, 1º ed., 2003. (disponível em: http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/livro_mef_aa_1ed/doc/livro_mef_aa.pdf).
- BAHADORI, M. Passive Cooling Systems in Iranian Architecture. Scientific American. n.2,v.238,p.144-154, 1978.
- BAMFORD, G.. From analysis/synthesis to conjecture/analysis: a review of Karl Popper's influence on design methodology in architecture. Design Studies 23, Elsevier Science Ltd., p. 245-261, 2002.
- BAPTISTA, G. Ilhas de Urbanas de Calor. Scientific American Brasil, n. 8, p. 54-59, 2003.
- BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, Koen. Daylighting in architecture: A European Reference Book. Londres. James and James Editors, 1993
- BARKI, J., Diagrama como Discurso Visual: uma velha técnica para novos desafios. In: 8º DOCOMOMO, Sessão 3 – O movimento moderno e os novos desafios ecológicos e técnicos. Rio de Janeiro, 2006.
- BENSON, T. Navier-Stokes Equation – 3 dimensional unsteady. Glenn Research Center, National Aeronautics and Space Administration – NASA, 2007. (disponível em: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/nseqs.html>).
- BIN, X.; ZHONGYI, Z. Graph Theory. West China Normal University Press, Shanghai, 2010.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C.. Introdução à Ventilação Natural. EdUFAL, 3ª edição. Maceió, 2008.
- BOWLER, D.; BUYUNG-ALI, L.; KNIGHT, T.; PULLIN, A. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. Landscape and Urban Planning, vol. 97, p. 147-155, 2010.
- BOUTET, T. Controlling Air Movement: a manual for architects and builders. McGraw-Hill Book Company. New York, 1987.
- BRAGER, G; de DEAR, R. Climate, Comfort, & Natural Ventilation: a new adaptive comfort standard for ASHRAE Standard 55. Center of the Built Environment – University of California, Berkley, 2001.
- CARDINALE, N., MINUCCI, M., RUGGIERO, F. Analysis of energy saving using natural ventilation in a traditional Italian buildings. Energy and Buildings, vol 35, p. 153-159, 2003.

- CAMPANHONI, I. Implantação dos Edifícios em Águas Claras – DF: influência no desempenho térmico ambiental dos espaços abertos. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAU/ UnB. Brasília, 2012.
- CEN EN 13779 Ventilation for Non-residential Buildings: performance requirements for ventilation and room-conditioning systems, Brussels, 2004.
- SWAMI, M. CHANDRA, S. Procedures for Calculating Natural Ventilation Airflow Rates in Buildings. Florida Solar Energy Center. Flórida, 1987.
- CHEN, Q.. Ventilation Performance Prediction for Buildings: a method overview and recent applications. Building and Environment, vol.44, p. 848-858, 2009.
- CEC (Commission of the European Communities). Biological Particles in Indoor Environments. European Concerted Action, Indoor Air Quality and Its Impact on Man, COST Project, Report N. 12, EUR 14988 EN, Luxemburg, 1993. (disponível em: http://www.inive.org/medias/ECA/ECA_Report12.pdf).
- CIB (International Council of Research and Innovation in Building and Construction). Performance Criteria of Buildings for Health and Comfort. ISIAQ-CIB Task Group TG 42. CIB n° 292, 2004. (disponível em: <http://www.isiaq.org/publications/TG42-report.pdf>).
- COOPER, G.. Air-Conditioning America: Engineers and the Controlled Environment, 1900-1960. The Jonh Hopkins University Press, 1998.
- CRAWLEY, D.; HAND, J; KUMMERT, M.; GRIFFITH, B. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and Environment, vol. 43(4), p.66-73, 2008.
- CRES (Centre for Renewable Energy Sources). Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach. 2004. (disponível em: http://www.cres.gr/kape/education/1.design_guidelines_en.pdf).
- CROSS, N.. Engineering Design Methods: Strategies for Product Design. John Wiley & Sons, Ltd. 2000.
- CRUZ, A. Algoritmos. Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – NCE/UFRJ. 1997 (disponível em <http://equipe.nce.ufrj.br/adriano/c/apostila/algoritmos.htm>).
- de Dear, R.; BRAGER, G.; COOPER, D.. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. Final Report ASHRAE RP – 884, 1997.
- de GIDS, W. Advanced Components for Ventilation. *In*: Building Ventilation: the state of the art. Santamouris and Wouters (eds.). Earthscan, London, 2006.
- DOLS, W. S.. A Tool for Modeling Airflow & Contaminant Transport. ASHRAE Journal – Practical Guide. March, 2001.
- DOLS, W.; EMMERICH, S. LoopDA – Natural Ventilation Design and Analysis Software. National Institute of Standards and Technology. 2003. (disponível em: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build03/PDF/b03062.pdf>)
- DRACH, P.. Modelagem Computacional e Simulação Numérica em Arquitetura Visando Conforto em Ambientes Construídos. Tese de

Doutorado. Laboratório Nacional de Computação Científica. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional. Petrópolis-RJ, 2007.

- DRACH, P.; VASCONCELLOS, V.; CORBELLA, O. Desenvolvimento de Experimentos didáticos para Visualização de Vento: simulação experimental em túnel de vento e simulação computacional. Anais...ECACE/ENLACAC, Canela, 2010.
- DUTRA, L.; YANNAS, S.. Análise do Processo de Projeto Bioclimático. In.: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído – ENTAC. Florianópolis, 2006.
- ECA (European Collaborative Action). Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure: Ventilation Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy. Report 23, Joint Research Centre – Institute for Health and Consumer Protection, European Commission, Office of Official Publication. Luxemburg, 2003.
- EMMERICH, S. J., DOLS, W. S., AXLEY, J. W. Natural Ventilation Review and Plan for Design and Analysis Tools. NISTRIR 6781. Prepared for Architectural Energy Corporation Boulder, Colorado, 2001.
- Engineering Simulation Scientific Software – ESSS. Apostila do Curso ANSYS CFX – Introdução. São Paulo, 2012.
- ETHERIDGE, D.; SANDBERG, M. Building Ventilation: theory and Measurement. John Wiley and Sons, Chichester - UK, 1996.
- EUROPEAN COMMISSION 'Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings '. *Official Journal of the European Communities*, Brussels, 2003. (disponível em: http://www.adene.pt/sites/default/files/l_00120030104pt00650071.pdf)
- FARIA, L. Air Flow in the Urban Environment: an evaluation of the relationship between urban aspect ratios and patterns of airflow, wind velocity and direction in urban areas, and coefficient of pressure distribution on building envelopes. Tese de Doutorado. Universidade de Cardiff, País de Gales. 2012.
- FATHY, H..Natural Energy and Vernacular Architecture. The University of Chicago Press, Chicago, 1986. (disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/64646797/Natural-Energy-and-Vernacular-Architecture>).
- FAVAROLO, P.; MANZ, H. Temperature-driven Single-sided Ventilation through a Large Rectangular Opening. Building and Environment vol. 40, pg. 689-699. 2005.
- FEUSTEL, H.; SMITH, B..COMIS 3.0 – User's Guide. Lawrence Berkley National Laboratory. California, 1998. (disponível em: <http://epb.lbl.gov/comis/>).
- FEUSTEL, H. E.; KENDON, V. M.. Infiltration Models for Multicellular Structures: a literature review. Energy and Buildings, Vol. 8, n°. 2, 1985.
- FISK, W. J.Estimates of Potential Nationwide Productivity and Health Benefits from Better Indoor Environments: an update. *In*: Indoor Air Quality Handbook. Cap. 4. Spengler J. D.; Samet, J.; McCarthy, J. F. (ed.). McGraw-Hill, 2001.

- FITZGERALD, S.; WOODS, A. The influence of stack on flow patterns and stratification associated with natural ventilation. *Building and Environment*, 43(10): 1719-1733, 2008.
- GANDEMER, J.; BARNAUD, G. Ventilation Naturelle des Habitations sous Climat Humide: approach aerodynamique. Report for the CSTB, 1989.
- GEORGIAKIS, C.; SANTAMOURIS, M. Wind and Temperature in the Urban Environment. *In: Natural Ventilation in the Urban Environment: assessment and design*. Ghiaus e Allard (eds.). Earthscan, London, 2005.
- GIVONI, B.. Man, Climate and Architecture. Applied Science Publishers. London, 1976.
- GIVONI, B. Passive Low Energy Cooling of Buildings. John Wiley & Sons Inc. 1994.
- GIODA A, NETO A. chemical pollution related to the indoor air in Brazil. *Quim. Nova* 2003, vol. 26, n°3, 359-65.
- GHIAUS, C.; ALLARD, F. (eds.) Natural Ventilation in the Urban Environment: assessment and design. Earthscan, London, 2005.
- GIACCHINI, B. Uma Breve Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Matemática, janeiro de 2012. (disponível em: file:///C:/Users/Gustavo/Desktop/_Giacchini_2012_Uma%20breve%20introdu%C3%A7%C3%A3o%20ao%20M%C3%A9todo%20dos%20Elementos%20Finitos.pdf).
- GROSSO, Mario. Il raffrescamento passivo degli edifici. Rimini: Maggioli Editori, 1997.
- HARBER, P.; SCHENKER, M.; BALMES, J. Occupational and Environmental Respiratory Diseases. St. Louis, 1995.
- HEISELBERG, P.; MURAKAMI, S.; ROULET, C. Ventilation of Large Spaces in Buildings; analysis and prediction techniques. Energy Conservation in Buildings and Community Systems – IEA, Annex 26, 1998.
- HOLMES, J. Wind Load in Structures. Spon Press, 2° edition. New York, 2001.
- HUMPHREYS, M.; NICOL, J.. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*. n.34, p.667-684. 2002.
- HUSMAN, T.; KOSKINEN, O.; HYVARINEN, T.; RUUSKANEN, J.; NEVALAINEN, A. Respiratory symptoms and infections among residents in dwellings with moisture problems or mold growth. *Proceedings of Indoor Air 1993*, The 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate p. 171-174, Helsinki, 1993.
- HUSMAN, T. Health effects of indoor-air microorganisms. *Scandinavian Journal of Worker Environmental Health* no. 22, p. 5-13, 1996.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Normas Climatológicas Brasileiras (1961-1990). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>;

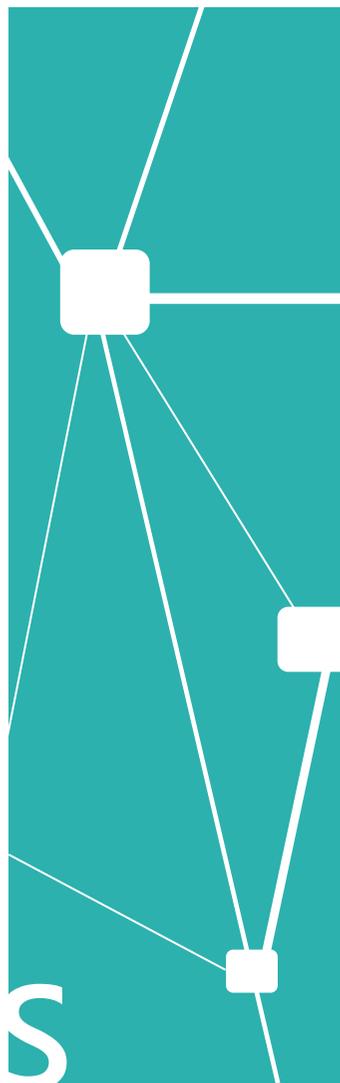
- INTERNATIONAL RESIDENCIAL CODE – IRC. International Code Council, INC, 2012.
- IKEDA, D. F. Análise de Projeto com Foco em Iluminação Natural: aprimoramento e validação de um método. Dissertação (mestrado). Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo; Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2012.
- JANSSEN, J. The History of Ventilation and Temperature Control. ASHRAE Journal, September, 1999.
- JENSEN, F. Bayesian Networks and Decision Graphs. Springer-Verlag, New York, 2001.
- JORDAN, M. Learning in Graphical Models. The MIT Press, 1998.
- JUNIOR, A. Método dos Volumes Finitos para Equação de Convecção e Difusão em uma Dimensão Espacial. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Universidade Federal Fluminense – UFF, Volta Redonda, 2012.
- LANGMUIR, A.D.; JARRETT, E. T.; HOLLAENDER, A. Studies of the control of acute respiratory diseases among naval recruits, III. The epidemiological pattern and the effect of ultraviolet radiation during the winter of 1946-1947. American Journal of Hygiene 48: pg. 240 – 251. 1948.
- LARANA (Laboratório de Radioatividade Natural do Rio Grande do Norte). Consequências do Gás Radônio na Saúde Humana. Natal, 2010. (disponível em: <http://www.lageoma.geologia.ufrn.br/larana/downloads/cartilhalarana.pdf>)
- LARSEN, T.; HEISELBERG, P. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. Energy and Buildings;40(6): 1031–40, 2008.
- LAURITZEN, S. Graphical Models. Oxford University Press, New York, 1996.
- Lei nº 2.105 de outubro de 1998. Dispõe sobre o Código de Edificações do Distrito Federal.
- LIDDAMENT, M.. Air infiltration calculation techniques – an applications guide. Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), 1986.
- LIDDAMENT, M. A Guide to Energy Efficient Ventilation. AIVC, Contentry – UK, 1996.
- MAATOUK, K. A simplified procedure to investigate airflow patterns inside tall buildings using COMIS. Architectural Science Review, vol. 50(4): p. 365-369, 2007.
- MADSEN, T. L. Measurement and Control of Thermal Comfort in Passive Solar Systems. Report nº 231. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark. 1987.
- MASCARÓ, J. O Custo das Decisões Arquitetônicas. Masquatro Ed., Porto Alegre, 2010.
- MASSEY, B.; SMITH, J.. Mechanics of Fluids. Taylor & Francis. London, 2002.
- MEGRI, A. Building load and energy simulation programs and the design process. International Journal of Ventilation; vol. 6(2), p. 177-192, 2007.

- MELIA, R. Association between gas cooking and respiratory disease in children. *British Med. Journal*2: 149-152. 1977.
- MELIKOV, A.; POPIOLEK, Z.; SILVA M.; CARE, I.; SEFKER, T. Accuracy limitations for low-velocity measurements and draft assessment in rooms. *HVAC&R Research*;13(6):971–86, 2007.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria GM/MS nº 3.523 de 28 de agosto de 1998.
- NIKOLOPOULOU, M.; LYKOURDIS, S. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries. *Building and Environment* vol. 41 (1455-1470), 2006.
- OLGAY, V.. *Design with Climate*. New Jersey, Princeton University Press, U.S.A, 1963.
- OKE, T. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observation at Urban Sites. World Meteorological Organization – Report nº 81. 2006.
- PIRHONEN, I.; NEVALAINEN, T.; HUSMAN, T.; PEKKANEN, J. Home dampness, moulds and their influence on respiratory infections and symptoms in adults in Finland. *European Respiratory Journal* vol. 9 no. 12 (pg. 2618-2622), 1996.
- PRIOLO, C. Design Guidelines and Technical Solutions for Natural Ventilation. In.: *Natural Ventilation in Buildings*. Allard, F.(ed.).James & James. London, 2002.
- KHOUKHI, M.; YASHINO, H.; LIU, J. The effect of wind speed velocity on the stack pressure in medium-rise buildings in cold region of China. *Building and Environment*, vol. 42(3): p. 1081-1088, 2007.
- KOENIGSBERGER, O.; INTERSOL, T.; MAYHEW, S.; SZOKOLAY, S.. *Viviendas y Edificios em Zonas Cálidas y Tropicales*. Ed. Paraninfo. Madrid, 1977.
- KOLLER, D.; FRIEDMAN, N.; GETOOR, L.; TASKAR, B. Graphical Models in a Nutshell. In.: *Introduction to Statistical Relational Learning*. Getoor e Taskar (eds). The MIT Press, 2007.
- KNOLL, B. *Advanced Ventilation Systems*. TN 35, AIVC, Coventry, UK. 1992
- KOWALTOWSKI, D.; CELANI, M.; MOREIRA, D.; PINA, S.; RUSCHEL, R.; LABAKI, L.; PETRECHE, J. Reflexão sobre Metodologias de Projeto Arquitetônico. *Ambiente Construído*, v. 6, n. 2, p. 07-19, abr./jun. 2006.
- KWOK, A. Thermal Comfort Concepts and Guidelines. In.: *Indoor Air Quality Handbook*. Cap. 15. Spengler J. D.; Samet, J.; McCarthy, J. F. (ed.). McGraw-Hill, 2001
- RATTI, C.; BAKER, N.; STEEMERS, K. Energy Consumption and Urban Texture. *Energy and Buildings*, 37 (7), pg. 762-776, 2005.
- ROSENSTOCK, L.; CULLEN, M. *Textbook of Clinical, Occupation, and Environmental Medicine*. W.B Saunders – Philadelphia, 1994.
- ROMERO, Marta A. B.. *Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano*. ProEditores, 2ª edição, São Paulo, 2000.

- ROMERO, M. Arquitetura Bioclimática do Espaço Público. Ed. Universidade de Brasília (3ª reimpressão), Brasília, 2007.
- ROMERO, M.; SOUZA, V. Construindo um Sistema de Indicadores de Sustentabilidade Intra-urbano Associados à Ventilação nos Espaços Públicos. Paranoá: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo / Revista do Programa de Pós-Graduação da FAU-UnB. Ano 6, n. 4 (novembro/2007). P. 81-94. 2007.
- ROMERO, M. Arquitetura do Lugar: uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília. Ed. Nova Técnica. São Paulo-SP, 2011.
- ROM, W. R. Environmental and Occupational Medicine. 3° ed. Lippincott Williams & Wilkins. Philadelphia, 1998.
- SAMET, J. Nitrogen dioxide. In.: *Indoor Air Pollution: A Health Perspective*. J. Samet e J.D. Spengler (ed.). Johns Hopkins Press. Baltimore, 1991.
- SANDBERG, M. Whole-field measuring methods in ventilated rooms. HVAC&R Research;13(6):951-70, 2007.
- SANTAMOURIS, M., ASIMAKOPOULOS, D.. Passive Cooling of Buildings. James & James. London, 1996
- SANTAMOURIS, M.; DASCALAKI, D.. Prediction Methods, in Allard, F. (ed.) Natural Ventilation in Buildings: a Design Handbook. James & James, London, 2002.
- SANTAMOURIS, M., WOUTERS, P.(eds.). Building Ventilation: the state of the art. Earthscan, London, 2006.
- SANTAMOURIS, M. Ventilation for Comfort and Cooling: The State of Art. In Building Ventilation: the state of the art. Santamouris and Wouters (eds.). Earthscan, London, 2006.
- SALAT, S. BOURDIC, L. Urban Complexity, Efficiency and Resilience. In.: Energy Efficiency – A Bridge to Low Carbon Economy. Morvaj, Z. (ed.) Chapter 2. InTECH ed. 2012.
- SALES, G. Relatório Técnico de Avaliação de Conforto Térmico e Ventilação Natural Centro de Visitantes Flutuante ICMBio – Rio Negro/AM. QUALI-A Consultoria Ambiental, 2013.
- SEPPANEN, O.. The Effect of Ventilation on Health and Other Human Responses. In.: Building Ventilation: the state of the art. Cap. 2 (pg. 247 – 264). Santamouris and Wouters (ed.). Earthscan, London, 2006.
- SHERMAN, M. ASHRAE's New Ventilation Standard. American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers – Technical Article. ASHRAE Journal, 2004.
- SHERMAN, M. ASHRAE's First Residential Ventilation Standard. ASHRAE, 2004. (disponível em: http://web.ornl.gov/sci/buildings/2012/2004%20B9%20papers/012_Sherman.pdf).
- SILVA, C. O Conforto Térmico de Cavidades Urbanas: contexto climático do Distrito Federal. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

- SOUZA, V. A Influência da Ocupação do Solo no Comportamento da Ventilação Natural e na Eficiência Energética em Edificações. Estudo de Caso em Goiânia – Clima Tropical de Altitude. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. PPG/FAU. Brasília, 2006.
- SPENGLER, J. D.; SAMET, J. A perspective on Indoor and Outdoor Pollution. In.: Indoor Air Pollution. Samet and Spengler (Eds.) The John Hopkins University Press. Baltimore, 1991.
- SPENGLER, J. D.; SAMET, J.; MCCARTHY, J. F. (Ed.). Indoor Air Quality Handbook. McGraw-Hill, 2001.
- SPIEGEL, M.; SCHILLER, J.; SRINIVASAN, R. Probabilidade e Estatística. Editora Bookman, 2ª Ed., 2004.
- TOLEDO, A.; PEREIRA, F. Potencial da Mesa D'água para a visualização Analógica da Ventilação Natural em Edifícios. In.: Anais do Encontro Nacional do Conforto no Ambiente Construído, p. 1383 – 1390, Curitiba, 2003.
- TOLEDO, A. Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos: uma aplicação em Maceió/AL. Tese (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.
- TROMBLY, B. The International Building Code. CMGT 564 – Term Paper. 2006. (disponível em: <http://www.strategicstandards.com/files/InternationalBuildingCode.pdf>).
- WALTON, G. N.; DOLS, W. S.. CONTAM User Guide and Program Documentation. National Institute of Standards and Technology – NIST, U.S Department of Commerce, 2005.
- WARGOCKI, P., SUNDELL, J., BISCHOF, W., BRUNDRETT, G., FANGER, O., GYNTELBERG, F., HANSSSEN, S., HARRISON, P., PICKERING, A., SEPPANEN, O., WOUTERS, P. Ventilation and health in non-industrial indoor environments: Report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting, International Journal of Indoor Environment and Health, vol. 12, p. 113 -128, 2002.
- WHO (World Health Organization). Fact Sheet 350. Geneva, Switzerland, 2011.
- WOUTERS, P.; DELMOTTE, C.; HEIJMANS, N. Ventilation in Standards and Regulations. In Building Ventilation: the state of the art. Santamouris and Wouters (eds.). Earthscan, London, 2006.
- WOUTERS, P.; BARLES, P.; BLOMSTERBERG, A.; BULSING, P.; GIDS, W.; DELMOTTE, C.; FILLEUX, C.; HARDEGGER, P.; LEAL, V.; MALDONADO, E.; PENNYCOOK, K. Towards to Improved Performance of Mechanical Systems. EC PROJECT TIP-Vent project. 2001.
- WRIGHT, G. NFPA initiative blunts code unification efforts. Building Design & Construction. 11 de agosto de 2010. (disponível em: <http://www.bdcnetwork.com/code-wars>)
- ZURAIMI M, TAN Z. Impact of residential building regulations on reducing indoor exposures to outdoor PM2.5 in Toronto. Building and Environment 2015; 89: 336-344.

APÊNDICES



Introdução

Os Apêndices apresentam todo o material complementar gerado pela presente tese. Este material pode auxiliar o leitor na compreensão dos procedimentos realizados e resultados alcançados ao longo do desenvolvimento do Diagrama de Ventilação Natural. Primeiramente são apresentados os procedimentos de simulação computacional para a quantificação da pontuação dos itens 1.3 e 1.4 do DVN. Posteriormente é abordado o *Mind Map* da estrutura do DVN e possibilidades de análises. Por fim, é apresentado a estrutura de desenvolvimento/programação e linguagem computacional da ferramenta.

APÊNDICE I | Desenvolvimento das Simulações Computacionais

Procedimento de Simulação das Variáveis do Item 1.3

Para a quantificação da pontuação do item 1.3 do DVN foi desenvolvido, primeiramente, um volume de 3 x 3 x3 metros – sendo este considerado como “volume de referência”. No entorno imediato à este volume foram desenvolvidos volumes idênticos distanciados 3 metros entre si (relação W/H = 1), conforme apresenta a Figura A. 1. Para o desenvolvimento dos volumes sólidos foi utilizado o programa CAD SolidWorks, versão 2012.

Posteriormente, ao redor dos sólidos desenvolvidos, foi criado um volume com as dimensões de 60 x 120 x 60 metros (Figura A. 2). Este volume representa o domínio onde serão inseridos todos os parâmetros de escoamento do fluido, tais como: velocidade de escoamento do fluido, tipo de fluido, regime de escoamento (laminar ou turbulenta), sentido de escoamento, entre outros.

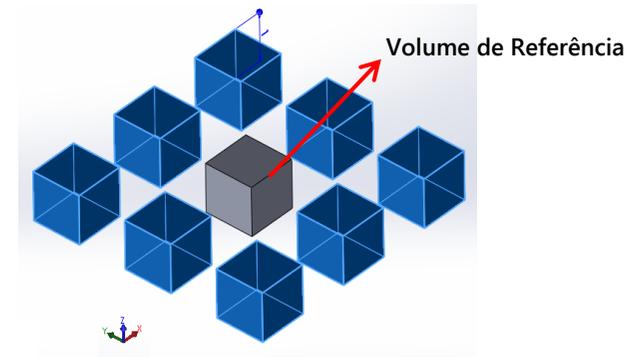


Figura A. 1 – Modelo desenvolvido para a representação do Cenário 1 do Item 1.3.

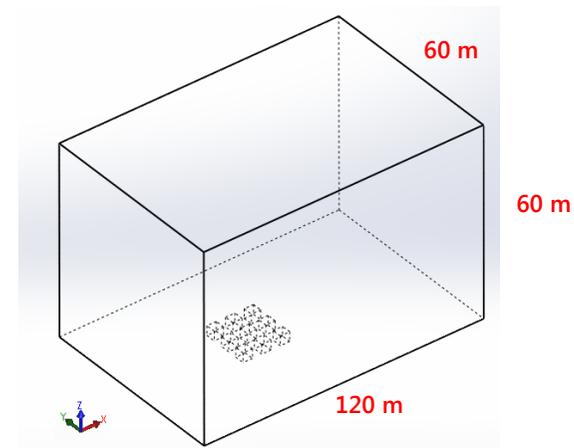


Figura A. 2 – Inserção do domínio ao redor dos sólidos criados.

As dimensões estabelecidas para o domínio buscam a não interferência das suas superfícies de borda (paredes) nos resultados. Além disso, as dimensões empregadas visam a otimização do tempo de simulação dos cenários – uma vez que o tamanho do domínio é proporcional ao número de pontos da malha de análise. Ou seja, quanto maior for o volume do domínio maior será o número necessário de pontos, na malha de análise, para se alcançar uma precisão confiável nos resultados – consequentemente maior será o tempo de processamento das simulações.

A determinação do número de pontos (nós) da malha utilizada no domínio, bem como a sua forma, representa o processo conhecido como refinamento da malha. Quanto maior for o refinamento da malha maior será a precisão e confiabilidade dos resultados – uma vez que maiores serão os números de pontos onde as equações de conservação serão resolvidas e menores serão as regiões livres de nós (pontos de análise).

O processo de refinamento busca, também, concentrar o maior número de nós nas regiões de maior interesse e/ou com geometria mais complexa – reduzindo, consequentemente, o número de nós nas regiões de menor interesse e/ou menos complexas. A lógica é reduzir o tempo

gasto nas simulações, e focar o processamento dos dados nas regiões de interesse – onde se necessita determinar/quantificar as alterações no fluxo de escoamento do fluido.

Para a geração da malha e seu refinamento foi utilizado o aplicativo de geração de malhas do programa ANSYS, presente na sua *suit* denominada Workbench (Figura A. 3). Os parâmetros de refinamento das malhas são exemplificados na Figura A. 4, e estão presentes nos relatórios de resultados dos cenários simulados (ver CD em anexo). Em resumo, para os cenários simulados, foi utilizada uma malha constituída por tetraedros – tendo seu grau de expansão e tamanho controlados pelos critérios de maior precisão do programa nas regiões “próximas e de encontro de faces” das superfícies críticas, determinadas na geração da malha: entrada de ar, saída de ar, sólidos (entorno) e volume de interesse (ver Figura A. 4).

O número de pontos (nós) e elementos (tetraedros) gerados para cada cenário simulado é um parâmetro importante para a qualidade das simulações. Ou seja, em um grupo de cenários simulados, malhas com diferentes graus refinamentos implicam em resultados que podem não ser confiáveis em termos de comparação. Para os cenários do Item 1.3 buscou-se padronizar as malhas em valores acima de 20.000 nós e 100.000

elementos – malhas com elevado grau de refinamento, considerando o volume do domínio e a simplicidade dos sólidos analisados (ESSS, 2012).

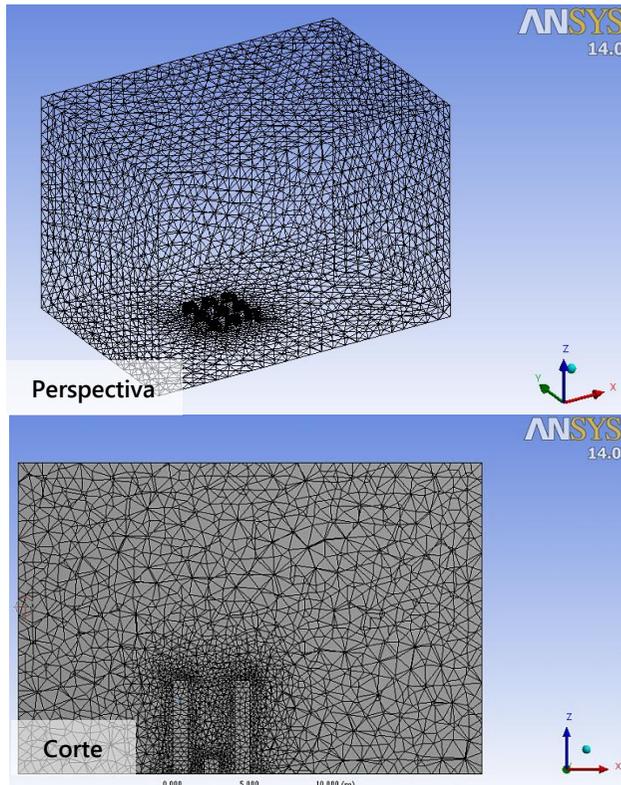


Figura A. 3 – Exemplo de malha gerada no programa ANSYS para as simulações dos cenários do Item 1.3.

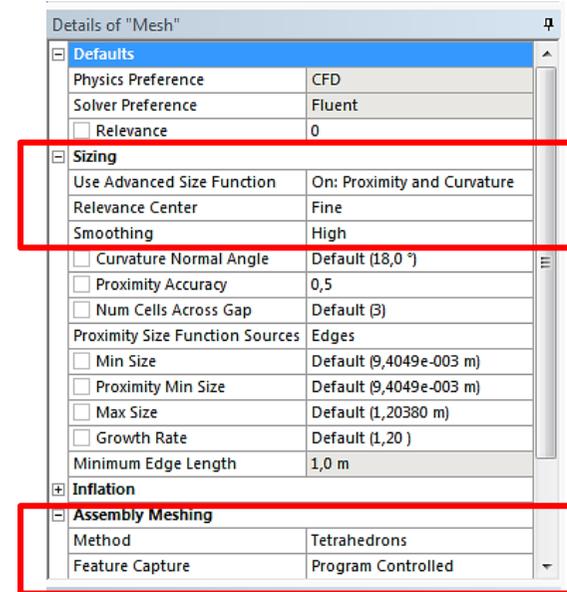


Figura A. 4 – Detalhes dos parâmetros utilizados na geração das malhas.

Após a geração da malha de análise foram inseridos os parâmetros do fluxo do fluido. Foi utilizado o ar como fluido, em uma temperatura de 25 °C – padrão do programa – com escoamento contínuo. Foi utilizado um modelo físico isotérmico (sem trocas de calor), com pressão atmosférica de 1 atm, e padrão de turbulência “moderado” (padrão do programa) sendo

equacionado pelo modelo K-epsilon³⁰. A velocidade de escoamento (dado aplicado ao *inlet* – entrada do ar no domínio) varia conforme a cidade escolhida e possui como base os dados da Tabela 4. 1, abordada no Capítulo 4. Para a saída do ar (*outlet*) foi determinado uma pressão neutra (0 Pa) – padrão do programa. As bordas superior e adjacentes ao *inlet* foram definidas como o meio (espaço aberto), também não exercendo influência sobre o fluxo de ar (0 Pa de pressão), como exemplifica a Figura A. 5. Os detalhes quanto aos parâmetros físicos aplicados ao domínio para as simulações estão presentes nos relatórios de resultados (ver CD em anexo) – como exemplifica a Figura A. 6.

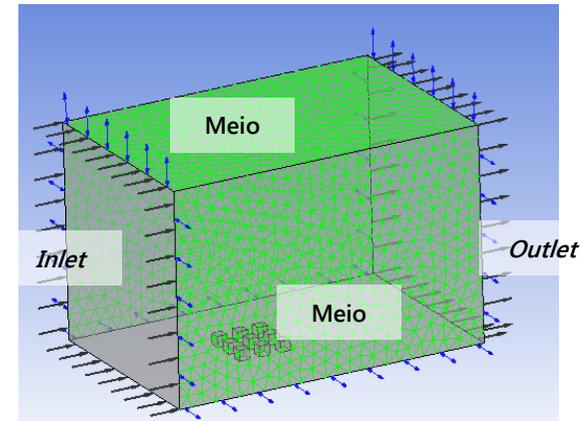


Figura A. 5 – Exemplo de Inserção dos parâmetros do domínio.

³⁰ Modelo mais comum utilizado em simulações de Dinâmica dos Fluidos para regimes de escoamento de fluidos não laminares. Serve para complementar a resolução das equações de conservação – implicando em resultados mais próximos à realidade dos regimes turbulentos.

3. Physics Report

Table 3. Domain Physics for CFX

Domain - Default Domain	
Type	Fluid
Location	solid
Materials	
Air at 25 C	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
Settings	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Isothermal
Fluid Temperature	2.5000e+01 [C]
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable

Boundary Physics for CFX	
Boundaries	
Boundary - inlet	
Type	INLET
Location	inlet
Settings	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Normal Speed
Normal Speed	1.5600e+00 [m s ⁻¹]
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
Boundary - space	
Type	OPENING
Location	space
Settings	
Flow Direction	Normal to Boundary Condition
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Opening Pressure and Direction
Relative Pressure	0.0000e+00 [Pa]
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
Boundary - outlet	
Type	OUTLET
Location	outlet
Settings	
Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Average Static Pressure
Pressure Profile Blend	5.0000e-02
Relative Pressure	0.0000e+00 [Pa]
Pressure Averaging	Average Over Whole Outlet
Boundary - Default Domain Default	
Type	WALL
Location	wall solid
Settings	
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Smooth Wall
Boundary - volume	
Type	WALL
Location	volume
Settings	
Mass And Momentum	No Slip Wall
Wall Roughness	Smooth Wall

Figura A. 6 – Exemplo dos parâmetros físicos aplicados ao domínio.

Após a inserção dos parâmetros no domínio, foi dado início às simulações. Para a melhor interpretação dos resultados foi utilizado o aplicativo de visualização do programa ANSYS,

inserido na *suit* Workbench, que possibilita a quantificação de um número expressivo de variáveis (ex.; pressão, velocidade, torque, resfriamento ou aquecimento das faces dos sólidos, etc.). Para a quantificação das variáveis do item 1.3 foi escolhida a interferência da altura do entorno sobre a formação da sombra de vento em relação ao volume de referência. Assim, buscou-se quantificar a redução da velocidade do ar sobre as faces X, Y e Z do volume de referência conforme o aumento da altura do entorno (Figura A. 7).

O programa fornece a velocidade média de escoamento do fluido incidente sobre faces previamente determinadas, tanto na forma gráfica (visualização por meio de *isocores*) como na forma numérica (tabela de velocidade média de escoamento do fluido). Neste último caso, as velocidades médias do fluido incidente sobre as faces é obtida pela média aritmética: valor de X é igual à média dos valores das faces orientadas para o eixo X e -X; valor de Y é igual à média dos valores das faces orientadas para o eixo Y e -Y; e o valor de Z, neste caso onde o volume de interesse está em contato com o solo, é a média dos valores da face Z. A Figura A. 8 exemplifica os valores da velocidade do fluido incidente sobre as faces, fornecidos pelo relatório de simulação do programa.

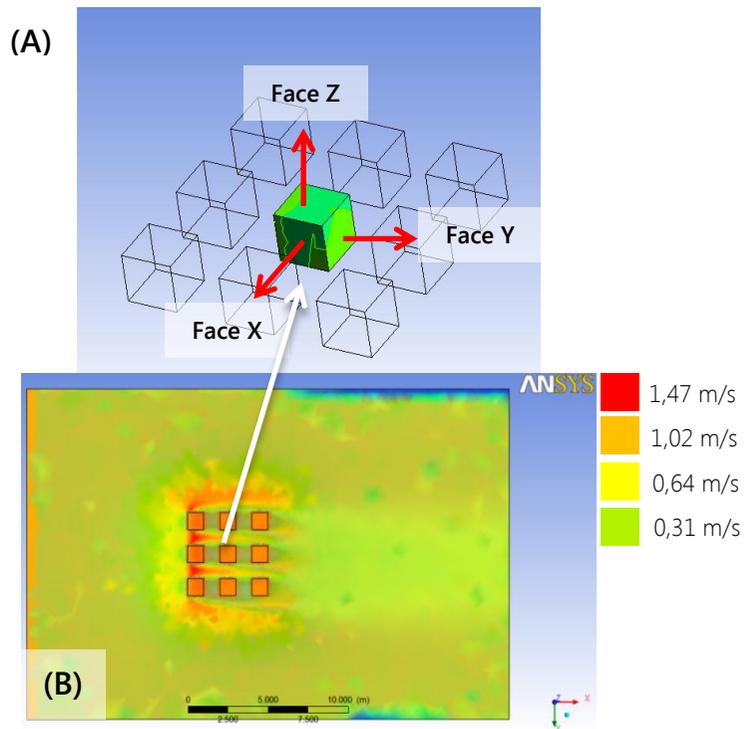


Figura A. 7 – Exemplo dos resultados obtidos quanto à velocidade de escoamento do fluido. (A - perspectiva) destaque para as *isocores* sobre o volume de referência informando a quantificação da velocidade média sobre as faces. (B - planta) resultado geral obtido para o Cenário 1.

4. Solution Report

Table 6. Forces and Torques for CFX

Location	Type	X	Y	Z
Default Domain Default	Pressure Force	9.6667e+00	-1.2869e+00	3.6000e-01
	Pressure Torque	-3.1841e+00	-9.6935e+01	-5.2603e+00
	Viscous Torque	1.4219e-02	1.5300e-01	-1.9127e+00
volume	Velocity	2.2003e+00	2.214e+00	2.227e+00
	Pressure Torque	2.5679e-01	-1.4541e-01	-4.6001e-02

Figura A. 8 – Exemplo da tabela de resumo dos resultados fornecida pelo relatório final do programa. Destaque para o resultado da velocidade média nas faces X, Y e Z do volume de referência.

Para a melhor organização, visualização e análise dos resultados fornecidos pelo programa foi desenvolvida uma tabela resumo dos resultados. Nesta tabela foi inserida a velocidade média obtida com base nos dados fornecidos pelo relatório do programa – possibilitando a análise geral da redução da velocidade do ar incidente sobre o volume de interesse Tabela A. 1.

Tabela A. 1 – Resultados das simulações dos cenários do Item 1.3. Em verde, valores acima de 70% da velocidade inicial do fluxo de ar (m/s); em amarelo valores < 70% e > 50%; e em laranja valores < 50%.

Resultados Simulações do Item 1.3						
Cenário	Velocidade Média do Ar sobre as Faces do Volume de Interesse					
	Belém	Brasília	Curitiba	Goiânia	São Paulo	Teresina
C1	1,25	2,31	1,85	0,91	1,22	1,45
C2	1,02	1,99	1,76	0,8	1,06	1,26
C3	0,86	1,74	1,56	0,58	0,89	1,09
C4	0,79	1,6	1,49	0,54	0,82	0,97
C5	0,75	1,44	1,42	0,48	0,75	0,84
C6	0,68	1,12	1,31	0,42	0,67	0,78
C7	0,55	1,09	1,15	0,36	0,6	0,63
C8	0,51	0,98	0,99	0,31	0,54	0,57
C9	0,46	0,9	0,91	0,29	0,51	0,52
C10	0,41	0,84	0,82	0,24	0,46	0,45

Assim, pode-se identificar, como mencionado no Capítulo 4, que o aumento da altura do entorno resulta na redução da velocidade do ar incidente sobre o volume de interesse. Tendo em vista a busca de um número reduzido de variáveis disponíveis para a análise no DVN, os resultados foram agrupados em três grupos. O agrupamento seguiu a graduação

de valores identificados – impacto da altura sobre a velocidade média no volume de referência. Ou seja, foi considerado “muito impactante” os cenários com valores abaixo de 50% da velocidade original do fluxo de ar (em laranja na Tabela A. 1); impactante os cenários com valores > 50% e < que 70% da velocidade original do fluxo de ar (em amarelo na Tabela A. 1); e “pouco impactantes” os cenário que conservaram valores acima de 70% da velocidade original do fluxo de ar (em verde na Tabela A. 1). As tabelas fornecidas pelo relatório final de simulação do programa, contendo os parâmetros utilizados e os resultados obtidos, estão no CD em anexo.

Procedimento de Simulação das Variáveis do Item 1.4

Para a quantificação da pontuação do item 1.4 do DVN foi utilizado procedimento semelhante ao descrito no item 1.3. Ou seja, os modelos tridimensionais representando os cenários foram construídos no programa SolidWorks e, posteriormente, simulados no programa ANSYS para a verificação da interferência da densidade de ocupação do entorno imediato

sobre a velocidade do fluxo de ar que atinge as superfícies em um volume de referência.

A construção dos cenários considerou o volume de referência (sólido com dimensões de 1x1x3 metros) posicionado no centro de uma área de 11 x 11 m². Os sólidos que representam a densidade de ocupação do entorno, calculada conforme a Equação 1. 1 descrita no Capítulo 1 - sendo posicionados ao redor do volume de interesse, possuindo altura fixa (3 m) e área de base variável dependendo do cenário (Figura A. 9). Desta forma, para a construção dos cenários a serem simulados foram consideradas as seguintes variações de densidade de ocupação do entorno:

- cenário 1 – densidade do entorno igual à 0 (sem entorno);
- cenário 2 – densidade do entorno igual à 0,07;
- cenário 3 – densidade do entorno igual à 0,27;
- cenário 4 – densidade do entorno igual à 0,60.

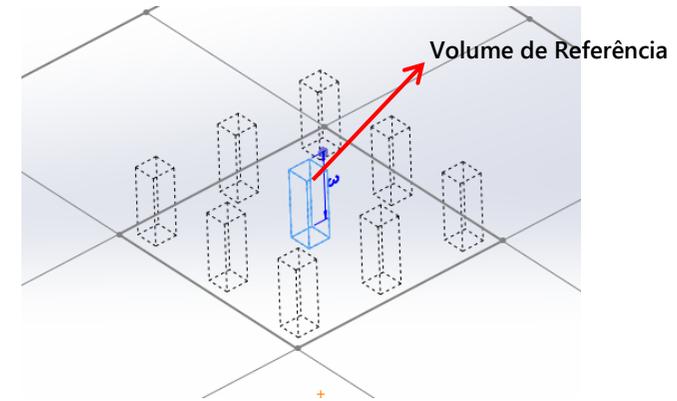


Figura A. 9 – Exemplo do posicionamento dos sólidos em relação ao volume de interesse, cenário 2.

Após a construção dos cenários foi gerado o domínio ao qual foram inseridos os parâmetros de escoamento do fluxo de ar. Para o item 1.4, o domínio foi construído com as dimensões de 150 x 200 x 30 metros – respeitando os afastamentos necessários para a não interferência das suas superfícies de borda sobre os resultados finais (Figura A. 10). Posteriormente, os cenários foram exportados para o programa ANSYS para o desenvolvimento das respectivas malhas de análise. O processo de refinamento das malhas seguiu o mesmo princípio descrito para o item 1.3, buscando padronizar as mesmas em valores acima de 20.000 nós e 100.000 elementos (Figura A. 11).

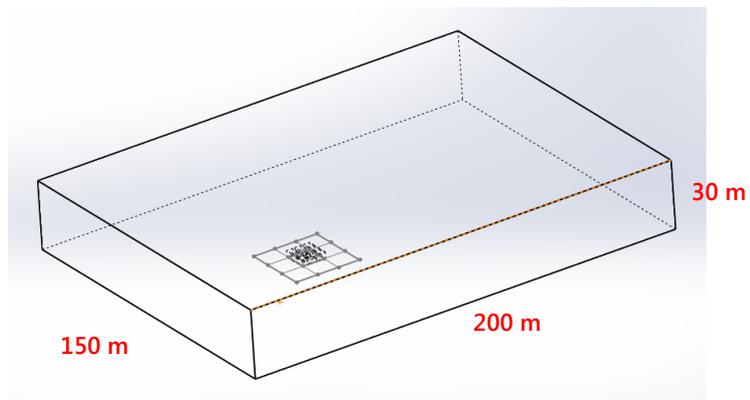


Figura A. 10 - Inserção do domínio ao redor dos sólidos criados.

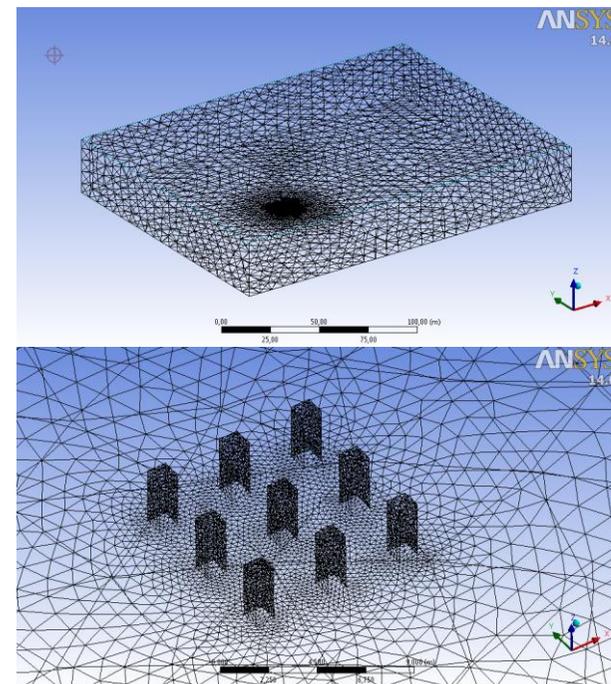


Figura A. 11 - Exemplo de malha gerada no programa ANSYS para as simulações dos cenários do Item 1.4.

Os detalhes dos parâmetros inseridos no domínio, para as simulações dos cenários de cada cidade analisada, se encontram no CD em anexo. A velocidade média do fluido incidente sobre as faces do volume de referência foi obtida da mesma forma descrita no item 1.3. A Figura A. 12 exemplifica os

resultados obtidos – que foram condensados na Tabela A. 2 utilizada para a quantificação das variáveis do item 1.4.

Tabela A. 2 - Resultados das simulações dos cenários do Item 1.4. Em verde, valores acima de 70% da velocidade inicial do fluxo de ar (m/s); em amarelo valores < 70% e > 50%; e em laranja valores < 50%

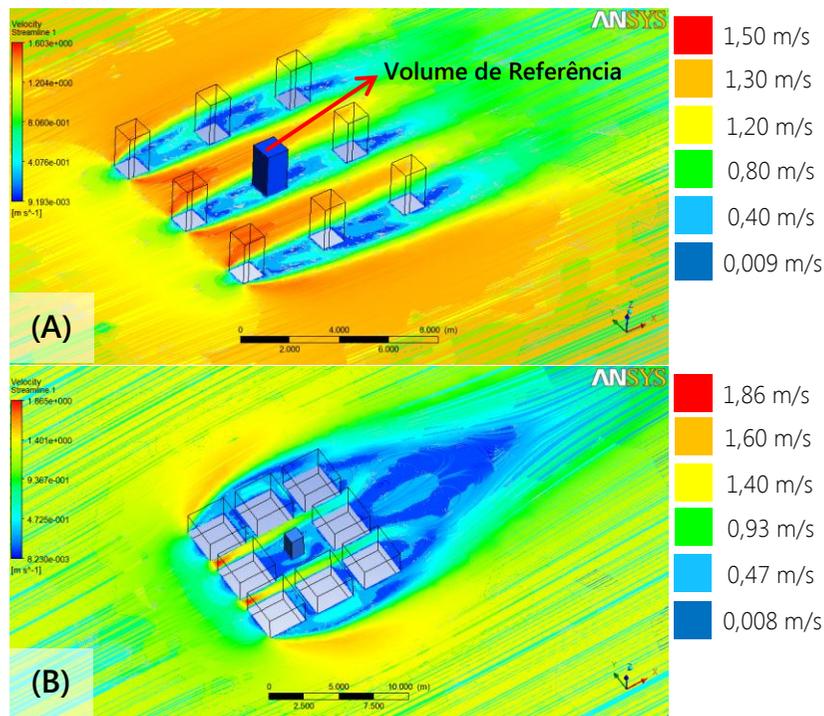


Figura A. 12 – Exemplo dos resultados obtidos no cenário 2 (A) e no cenário 4 (B) para a velocidade de escoamento do fluxo de ar conforme a densidade do entorno.

Resultados Simulações do Item 1.4						
Cenário	Velocidade Média do Ar sobre as Faces do Volume de Interesse					
	Belém	Brasília	Curitiba	Goiânia	São Paulo	Teresina
C1	1,29	2,28	2,1	0,97	1,3	1,51
C2	1,08	1,78	2,02	0,67	1,12	1,32
C3	0,8	1,45	1,67	0,51	0,76	0,94
C4	0,57	0,93	1,19	0,34	0,56	0,65

Assim, pode-se identificar, como mencionado no Capítulo 4, que o aumento da densidade de ocupação do entorno resulta na redução da velocidade do ar incidente sobre o volume de interesse. Tendo em vista a busca de um número reduzido de variáveis disponíveis para a análise no DVN, os resultados foram aglutinados em três grupos. O agrupamento seguiu a graduação de valores identificados – impacto da densidade sobre a velocidade média no volume de referência. Ou seja, foi considerado “muito impactante” os cenários com valores abaixo de 50% da velocidade original do fluxo de ar (em laranja na Tabela A. 2); impactante os cenários com valores > 50% e <

que 70% da velocidade original do fluxo de ar (em amarelo na Tabela A. 2); e “pouco impactantes” os cenário que conservaram valores acima de 70% da velocidade original do fluxo de ar (em verde na Tabela A. 2). As tabelas fornecidas pelo relatório final de simulação do programa, contendo os parâmetros utilizados e os resultados obtidos, estão no CD em anexo

APÊNDICE II | *Mind Map* do Diagrama de Ventilação
Natural

APÊNDICE III | Linguagem da Programação do Diagrama de Ventilação Natural

Para o desenvolvimento da ferramenta estão sendo utilizadas as seguintes linguagens:

1. PHP (versão 5.4);
2. *Framework Slim* (versão 2.0);
3. Biblioteca Bootstrap que já vem embutida CSS e jQuery (versão 3.3);
4. Utilização da biblioteca javascript bootbox para personalização de janelas modal.
5. Utilização da biblioteca javascript validator para validação de campos sensíveis que precisam ser verificados antes de serem submetidos à ferramenta.
6. HTML
7. Versionamento de código utilizando GIT
8. Ferramenta de versionamento de código Bitbucket

Foi utilizado também o Composer que é uma ferramenta para gerenciamento de dependência em PHP. Ele permite que você declare as bibliotecas de seu projeto e gerência (instalação/atualização).

Para o sistema de controle de versão optou-se pela utilização do GIT e para armazenamento do projeto foi utilizando o Bitbucket que é um sistema de controle de versões distribuído. Para composição e disponibilização das pastas e arquivos do sistema foram implementados seguindo os padrões da *framework Slim* que é uma micro *framework* em PHP que facilita na criação de pequenas APIs auxiliando na estruturação e modularização da aplicação, como mostrado a seguir:

- I. Pastas:
 - i. app
 - ii. documentacao
 - iii. public
 - iv. routers
 - v. vendor
 - vi. views
 - vii. gitignore
- II. Arquivos:
 - i. .gitignore
 - ii. .htaccess
 - iii. composer.json
 - iv. composer.lock

- v. config.php
- vi. index.php
- vii. README.md

O papel de cada arquivo ou pasta é discriminado a seguir:

- app: quando se fala em aplicação modular e de alta escalabilidade esta pasta conterá todas as classes e métodos da lógica da aplicação (lógica de negócio) do sistema.
- documentacao: conterá documento de apoio para geração da aplicação, como as regras de negócio, esta pasta e seu conteúdo não está acessível, foi criada para fins de consulta e apoio interno.
- public: conterá os arquivos de *style* css, arquivos javascript e imagens, ou seja, arquivos responsáveis para a sustentação da vistas para o usuário final.
- routers: Toda a navegabilidade da aplicação passará por um arquivo de rotas, que será responsável de renderizar o template de forma correta dependendo à ação requisitada pelo usuário.
- vendor: esta é a pasta onde será armazenada todas as bibliotecas e módulos externos à ferramenta, ou seja, módulos de terceiros.
- views: Toda a parte externa da ferramenta (páginas do front-end) serão contidas nesta pasta,
- .gitignore: quando se trabalha com versionamento de código alguns arquivos ou pastas não precisam ser enviados para o repositório, este arquivo se encarrega disso.

- .htaccess: arquivo de configuração distribuída que oferece um meio de fazer mudanças nas configurações por diretório.
- composer.json: arquivos responsáveis por assegurar que a aplicação dos infográficos trabalhe com módulos em versões específicas.
- config.php: arquivo de configuração inicial da ferramenta dos infográficos.
- index.php: arquivo de inicialização da ferramenta dos infográficos.
- README.md: arquivo de especificação de instalação e deploy da ferramenta