

EDITORA



**UnB**

# **Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído**

**Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,  
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni  
(Organizadores)**



Pesquisa,  
Inovação  
& Ousadia



**Universidade de Brasília**

**Reitora**  
**Vice-Reitor**

Márcia Abrahão Moura  
Enrique Huelva

EDITORA



**UnB**

**Diretora**

Germana Henriques Pereira

**Conselho editorial**

Germana Henriques Pereira (Presidente)  
Fernando César Lima Leite  
Beatriz Vargas Ramos Gonçalves de Rezende  
Carlos José Souza de Alvarenga  
Estevão Chaves de Rezende Martins  
Flávia Millena Biroli Tokarski  
Jorge Madeira Nogueira  
Maria Lidia Bueno Fernandes  
Rafael Sanzio Araújo dos Anjos  
Sely Maria de Souza Costa  
Verônica Moreira Amado

EDITORA



**UnB**

# **Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído**

Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,  
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni  
(Organizadores)



Pesquisa,  
Inovação  
& Ousadia

**Coordenadora de produção editorial**  
**Preparação e revisão**

**Equipe editorial**

Luciana Lins Camello Galvão  
Alexandre Vasconcellos de Melo

© 2018 Editora Universidade de Brasília

Direitos exclusivos para esta edição:  
Editora Universidade de Brasília  
SCS, quadra 2, bloco C, nº 78, edifício OK,  
2º andar, CEP 70302-907, Brasília, DF  
Telefone: (61) 3035-4200  
Site: [www.editora.unb.br](http://www.editora.unb.br)  
E-mail: [contatoeditora@unb.br](mailto:contatoeditora@unb.br)

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser armazenada ou reproduzida por qualquer meio sem a autorização por escrito da Editora.

Esta obra foi publicada com recursos provenientes do Edital DPI/DPG nº 2/2017.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília

---

S614            Simulação, ambiente e energia no espaço construído /  
                         organizadores, Caio Frederico e Silva ... [et al.]. – Brasília :  
                         Editora Universidade de Brasília, 2020.  
                         284 p. ; 23 cm. – (Pesquisa, inovação & ousadia).

ISBN 978-65-5846-043-5

1. Simulação computacional. 2. Desempenho energético. 3.  
Sustentabilidade. I. Silva, Caio Frederico e (org.). II. Série.

CDU 72

---

# Sumário

<b>Prefácio</b> .....	7
<i>Otto Ribas</i>	
<b>Apresentação</b> .....	9
<b>Parte 1: Inputs – conforto, vento e luz</b>	
<b>Capítulo 1.</b> Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met .....	17
<i>Caio Frederico e Silva e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
<b>Capítulo 2.</b> Caracterização de dados e arquivos climáticos de Brasília para simulação higrotérmica.....	55
<i>Vanda Alice Garcia Zanoni e José Manoel Morales Sánchez</i>	
<b>Capítulo 3.</b> Ferramentas para a simulação de ventilação natural na Arquitetura .....	99
<i>Gustavo de Luna Sales e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
<b>Capítulo 4.</b> Qualidade da luz natural e ferramentas para o projeto arquitetônico .....	127
<i>Júlia Teixeira Fernandes e Cláudia Naves David Amorim</i>	

## **Parte 2: Outputs – ambiente construído e energia**

**Capítulo 5.** Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil ..... 173

*Joára Cronemberger e Estefanía Caamaño-Martín*

**Capítulo 6.** Análise do balanço energético de casa pré-fabricada ZEB em Brasília ..... 215

*Larissa Sudbrack e Cláudia Naves David Amorim*

**Capítulo 7.** Considerações sobre uma pauta para governança da eficiência energética ..... 259

*Tássia Fonseca Latorraca, Raquel Naves Blumenschein e*

*Maria Vitória Duarte Ferrari*



# Parte 1

*Inputs* – conforto, vento e luz



## CAPÍTULO 3

# Ferramentas para a simulação de ventilação natural na arquitetura

Gustavo de Luna Sales e Marta Adriana Bustos Romero

### 1. A importância das ferramentas de cálculo da ventilação natural para a Arquitetura

De início, é importante destacar que o presente capítulo versa sobre as ferramentas de cálculo e quantificação da ventilação natural em edificações. Portanto, parte-se da premissa de que o profissional arquiteto considera que a ventilação natural é desejável para o projeto e que existe a necessidade de quantificação desta. Sabe-se que, para condições climáticas extremas e para certos tipos de uso – tais como escritórios, hospitais, hotéis, entre outros –, a ventilação natural não irá suprir completamente as necessidades dos usuários. Assim, a análise das condições favoráveis ou desfavoráveis para a utilização da ventilação natural fica a cargo do arquiteto projetista, não sendo esse assunto, no entanto, o objetivo específico deste tópico.

A ventilação natural é recomendada em aproximadamente 90% do território nacional como estratégia de melhoria das condições ambientais do projeto. Considerando que o Distrito Federal (DF) se enquadra nesse percentual, uma vez que possui condições climáticas favoráveis para o aproveitamento da ventilação natural, o profissional envolvido na construção do espaço deve se apoiar em ferramentas

específicas que o auxiliarão a encontrar soluções mais eficazes para o aproveitamento desse robusto potencial. Essa necessidade de auxílio deve-se ao fato de que a determinação do comportamento da ventilação natural, seja no meio urbano, seja no interior dos ambientes, é essencialmente uma tarefa árdua quando o profissional envolvido não possui grande experiência sobre o tema. Dessa forma, o presente capítulo esclarece quais são as principais ferramentas que podem auxiliar na análise da ventilação natural, em quais etapas do projeto elas são mais recomendadas e quais são seus benefícios e suas limitações. Busca-se, portanto, fornecer subsídios para a decisão de escolha do projetista da ferramenta mais adequada às suas necessidades.

Antes de tudo, é fundamental compreender a importância da ventilação natural e, conseqüentemente, a importância da utilização de ferramentas de simulação para analisá-la ao longo do processo de projeto.

A ventilação natural pode ser definida como o movimento do ar causado pela diferença de pressão e/ou diferença de temperatura. Os primeiros estudos sobre a importância da ventilação natural surgem com o propósito de assegurar o fornecimento de ar limpo às pessoas e a remoção de poluentes do ar – considerados “miasmas” causadores de graves doenças –, como descrito no tratado de Hippócrates (460 a.C), *Dos Ares, Águas e Lugares*. Enquanto no passado os principais focos de poluentes do ar estavam relacionados ao meio externo, atualmente as pessoas estão expostas a agentes nocivos até mesmo dentro de suas habitações – presentes em produtos de limpeza, materiais construtivos, decorrentes da preparação de alimentos, entre outros. Assim, no ar que se respira, composto pela mistura de gases, vapores e partículas, podem estar presentes centenas ou milhares de componentes químicos prejudiciais à saúde humana. Dessa forma, renovar adequadamente o ar dos ambientes que compõem uma habitação por meio da ventilação natural implica, por exemplo, reduzir o nível de exposição dos ocupantes às substâncias químicas e/ou orgânicas nocivas à saúde.

A baixa qualidade interna do ar pode causar sintomas 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, seja 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 entre \$15 e \$40 bilhões – com a redução dos sintomas da SED –, e entre \$20 e \$200 bilhões – com o aumento da produtividade de funcionários.

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 utilização da ventilação natural se configura como uma estratégia fundamental para o favorecimento do conforto higrotérmico, tanto no interior das edificações como no meio urbano. Sob o ponto de vista do conforto térmico, a renovação adequada do ar por meio da ventilação natural representa uma das principais estratégias para o alcance de níveis adequados de conforto térmico no Brasil. Por ser uma estratégia arquitetônica passiva – ou seja, 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. Dependendo das condições climáticas locais, é estimada uma redução de aproximadamente 50% no consumo de energia em climas quentes (CARROL *et al.*, 1982 citado por SANTAMOURIS, 2006) com a incorporação da ventilação natural no projeto arquitetônico. Por exemplo, estudos apontam que a ventilação natural pode representar um potencial de economia de energia em edifícios de, aproximadamente, 15% no Reino Unido, 53% na Itália e 30% na Grécia (EMMERICH; DOLS; AXLEY, 2001; CARDINALE; MINUCCI; RUGGIERO, 2003; SANTAMOURIS, 2006).

Com esta breve Introdução, fica evidente que, 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 encarada pelo projetista como simplesmente uma abertura voltada para o exterior.

Tão importante quanto saber da importância da ventilação natural para o projeto arquitetônico é saber quais são as ferramentas de quantificação e/ou análise que podem ser utilizadas. Ao longo do desenvolvimento do projeto de arquitetura, o profissional pode utilizar algumas ferramentas de previsões do comportamento da ventilação natural que irão considerar, tanto os elementos constituintes do entorno da edificação como as características do interior dos seus ambientes. Essas ferramentas podem variar de simples cálculos matemáticos até avançados programas computacionais de dinâmica dos fluidos (CFD). Em casos muito particulares ou em edificações em grande altura, recorre-se à ferramenta que mais se aproxima da realidade em termos de previsão do comportamento da ventilação – o túnel de vento. Se, por um lado, os modelos matemáticos são de aplicação rápida e “gratuita”, por outro, a aplicação das ferramentas CFD, por exemplo, fornece resultados mais precisos ao projetista, possibilitando a proposição de diretrizes de projeto que irão solucionar um determinado problema de forma eficaz e precisa. Apesar do custo mais elevado de aplicação, as ferramentas CFD podem levar a uma tomada de decisão mais acertada nas etapas iniciais do projeto de arquitetura – o que acarretará uma importante economia futura com climatização artificial e favorecerá a saúde dos usuários da edificação.

Dado o exposto acima, fica clara a importância da utilização de ferramentas de quantificação/análise da ventilação natural ao longo do processo de projeto de arquitetura – etapa em que se tem maior liberdade de alterações e melhorias. Por outro lado, o profissional necessita saber qual é a ferramenta mais adequada para atender seus objetivos, prazos e orçamento – tema abordado no próximo tópico.

## **2. Características das ferramentas de simulação da ventilação natural**

As principais ferramentas, também conhecidas como modelos, utilizadas na previsão do comportamento do fluxo do ar em edifícios são: modelos analítico e empírico, modelos multizona e de zona única, modelo em escala e CFD. Para a

melhor compreensão do universo de aplicação desses modelos, pode-se fazer a seguinte organização, sugerida por Heiselberg, Murakami e Roulet (1998):

- 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.

Os modelos analítico e empírico e multizona e de zona única são classificados como *modelos macroscópicos* – de utilização simples, rápida e com menor custo de aplicação; além de possuírem 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 em relação aos modelos macroscópicos – sendo o grau de detalhamento e precisão refletido no custo e no tempo envolvidos na sua aplicação.

A partir dessa organização, pode-se identificar melhor a aplicação mais adequada de cada modelo para a quantificação das necessidades de ventilação em relação às etapas do processo de projeto. Assim, 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 (HEISELBERG; MURAKAMI; ROULET, 1998).

Evidencia-se, portanto, 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. Analisando-se o processo de projeto, pode-se concluir que, quanto mais próximo se está 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 qualidade interna do ar e conforto térmico passivo na fase do Estudo Preliminar de Projeto, por exemplo, 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. Ou seja, nas etapas iniciais, os modelos macroscópicos são os mais adequados para auxiliar o projetista nas análises preliminares. É importante destacar, sob um ponto de vista geral, que a relação entre os modelos macroscópicos e microscópicos não se configura como hierárquica, mas, sim, como 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.

### 2.1 Caracterização dos modelos macroscópicos: modelos analíticos e empíricos

Os modelos analíticos aplicados à predição do comportamento do fluxo de ar em edifícios originam-se 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.<sup>1</sup> 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

---

<sup>1</sup> 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; SMITH, 2002).

no contexto científico, devido a 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, viscosidade, etc.). Dessa forma, a equação obtida para um determinado caso não pode ser aplicada a outro sem que sejam considerados os devidos ajustes. Já os modelos empíricos se diferem por utilizarem um número maior de aproximações – representadas na equação na forma de valores fixos ou constantes. Estas, por sua vez, são 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 1 e a Equação 2, apresentadas a seguir, exemplificam as diferenças entre o modelo analítico e o empírico. A primeira equação foi desenvolvida por Fitzgerald e Woods (2008) para estudarem a influência do “efeito chaminé” sobre o padrão do fluxo e da estratificação da temperatura do ar em ambientes ventilados naturalmente por duas aberturas. 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 Swami e Chandra (1987), Santamouris e Dascalaki (2002) e Chen (2009), em que a constante “0,025” foi obtida de forma empírica.

### **Equação 1**

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

Em que:

$\Delta T$  = elevação da temperatura no ambiente;

$Q_H$  = fluxo de calor distribuído;

$\alpha$  = coeficiente específico;

$\rho$  = densidade do fluido;

$C_p$  = calor específico;

$A$  = área efetiva de abertura;

$g$  = gravidade.

## Equação 2

$$Q_w = 0,025A_{eff}U_w$$

Em que:

$Q_w$  = fluxo de ar fornecido pela janela;

$A_{eff}$  = área efetiva da abertura;

$U_w$  = velocidade do ar incidente na janela.

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), 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). Essa equação, aparentemente simples, relaciona a geração de poluentes, as diferentes concentrações de poluentes entre o ar interno e externo, bem como a eficiência da ventilação (quando essa for a única forma de remoção dos poluentes do ambiente).

### Equação 3

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

Em que:

$Q_h$  = 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;

$\epsilon_v$  = 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, existe 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 ( $\epsilon_v$ ) como variável, não sendo esta conhecida quando se trata de ventilação natural.

Além de restrições quanto aos aspectos de qualidade interna do ar relacionados com a saúde humana, de forma geral, os modelos analíticos e empíricos não consideram a interferência das divisões internas do edifício – considerando-se 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, o que inviabiliza 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.

### 2.1.1. Modelos Multizona

De início, é importante tornar claro que a nomenclatura utilizada para denominar os modelos multizona pode variar entre autores de referência na área. Tal fato é atribuído ao próprio desenvolvimento do modelo ao longo do tempo e às diferentes traduções 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 multirrecintos (*multi-room*) (AXLEY, 2006).

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”.<sup>2</sup> Também são utilizados “nós de borda”<sup>3</sup> para representar o meio externo da edificação e pontos onde existe interação entre os nós de pressão no interior do edifício. Forma-se, portanto, uma malha, ou sistema, e que 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.

As principais vantagens desse modelo em relação aos modelos analítico e empírico, são: 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

---

<sup>2</sup> Ponto que representa as condições de pressão do ambiente, as quais se deseja determinar após a interação com os demais nós da malha.

<sup>3</sup> Ponto em que são inseridas as informações (conhecidas ou impostas) em relação à pressão exercida no exterior do edifício.

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 por meio 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.

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 do 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 produção acadêmica e aplicação no mercado de trabalho. 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; DOLS, 2005). Não obstante, percebe-se um viés mais voltado para a análise da quali-

dade 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, este programa não possui aplicação significativa em comparação ao CONTAM. Os programas CONTAM e COMIS são semelhantes em relação aos princípios e algoritmos utilizados para a obtenção dos resultados. No entanto, Feustel e Smith (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, 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 programas 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.

### 2.1.2. Modelos de Zona Única

O modelo de zona única (*zonal model*)<sup>4</sup> apresenta uma abordagem intermediária entre os modelos multizona e os modelos CFD, como afirmam Santamouris

---

<sup>4</sup> Também pode ser encontrado em trabalhos científicos com a nomenclatura de “modelo de subzona” [*sub-zone model*].

e Dascalaki (2002), ou seja, fornecem resultados mais detalhados em comparação aos modelos multizona, sendo, portanto, 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 um 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 obterem 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 concentra-se na análise de apenas um volume específico, subdividindo-o 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 precisos como, por exemplo, a estratificação dos campos de temperatura e velocidade do ar (que não são calculados no modelo multizona).

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 de 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. Por fim, as células que não sofrem influência direta de células de jato e de plumas são caracterizadas como “células de baixa velocidade”, cujo regime será alterado devido à influência das demais células.

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, Murakami e Roulet (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 “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; 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 tenha sido 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 se busca uma primeira avaliação – mais simplificada e rápida – da ventilação natural.

### 2.1.3. Modelos macroscópicos: 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 – haja vista os diferentes tipos de fluidos que podem ser simulados em câmaras ou túneis de vento (ex.: querosene, areia, água, entre outros).

As características a serem observadas estão relacionadas, principalmente, com o número de Reynolds,<sup>5</sup> o número de Grashof,<sup>6</sup> entre outros. Como aborda Chen (2009), em análises que envolvem transferência de calor – um dos principais motivos para a utilização dos modelos em escala – existem dificuldades 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 Freon,<sup>7</sup> 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:

<sup>5</sup> 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 ( $Re > 2400$ ).

<sup>6</sup> 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; SMITH, 2002).

<sup>7</sup> Gás derivado do metano.

a característica e calibração da câmara ou túnel de vento, a velocidade e direção do vento simulados, o detalhamento e representação do modelo físico e seu entorno, a qualidade dos equipamentos de medição, entres outros aspectos.

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 é aplicável para a visualização do escoamento do fluido sobre os elementos construídos (TOLEDO; PEREIRA, 2003; DRACH; VASCONCELLOS; CORBELLA, 2010). Por exemplo, Drach, Vasconcellos e Corbella (2010) abordam a aplicação prática desses 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, que geralmente envolvem 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, este capítulo não aborda um 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.

Cabe mencionar, *grosso modo*, que a aplicação do modelo 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). 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, esse modelo não está livre de erros, haja vista todo o processo envolvido nas medições e a calibração dos equipamentos.

#### 2.1.4. Modelos computacionais de dinâmica dos fluidos

A 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-Stokes<sup>8</sup>), concentração de espécies químicas e intensidade de turbulência. 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 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 finitos<sup>9</sup>, método dos elementos finitos,<sup>10</sup> entre outros. Assim, essa área de estudo passou a ser conhecida como Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

---

<sup>8</sup> Desenvolvidas 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.

<sup>9</sup> 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 a face do volume (JUNIOR, 2012).

<sup>10</sup> O Método dos Elementos Finitos baseia-se na discretização de um determinado domínio, representando-o como uma reunião de um número finito de elementos, de forma a resolver não o problema na forma original, e sim um que lhe é associado (AZEVEDO, 2003; GIACCHINI, 2012).

Os modelos computacionais de dinâmica dos fluidos predizem o escoamento de um fluido considerando 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) e, ainda, a engenharia aeronáutica, engenharia naval e outras.

Na predição da ventilação, os modelos CFD podem fornecer resultados quanto aos campos de distribuição da pressão, velocidade, temperatura, concentração de umidade e contaminantes no ar – presentes em ambientes internos e no espaço urbano, como abordam os trabalhos de Souza (2006) e Sales (2013).

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.

Em termos de aplicação, os programas computacionais de dinâmica dos fluidos vêm sendo elaborados e aplicados desde os anos de 1980 – sendo, desde então, tema de revisões que buscam identificar qual é a ferramenta mais precisa (AWBI, 1991; LIDDAMENT, 1996; ETHERIDGE; SANDBERG, 1996; HEISELBERG; MURAKAMI; ROULET, 1998; SANTAMOURIS; DASCALAKI, 2002; AXLEY, 2006). Por meio dessas revisões, pode-se observar toda a complexidade e a evolução envolvidas no desenvolvimento desse tipo de modelo.

Quanto à aplicação durante o desenvolvimento do projeto, os modelos CFD levam vantagem por integrarem-se aos programas de auxílio ao desenho arquitetônico (CAD) e aos programas de modelagem da informação de edifícios (BIM), como o AutoDesk© REVIT; e ainda aos de simulação energética, como o DesignBuilder. Assim, torna-se possível analisar aspectos da ventilação à medida que o projeto for modelado no computador. Com relação 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, bem como 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, dada a característica extremamente variável desse fenômeno e a estaticidade das simulações feitas no modelo CFD<sup>11</sup> – exigindo-se a validação dos diversos cenários possíveis (como, por exemplo, as variações anuais de temperatura e umidade do fluido).

### 3. Potencialidades e limitações da aplicação das ferramentas de cálculo da ventilação natural

Ao longo dos tópicos do presente capítulo foram abordados aspectos relacionados com as potencialidades e limitações no uso das ferramentas de cálculo da ventilação natural. Para evidenciar tais potencialidades e limitação, foi realizada uma análise comparativa dos modelos utilizando-se os seguintes parâmetros relacionados com a aplicabilidade dos modelos:

---

<sup>11</sup> 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.

- 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.

**Quadro 1:** Quantificação dos modelos de análise e predição em relação aos parâmetros estabelecidos

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

Fonte: Elaboração dos autores (2016).

Além do estabelecimento desses parâmetros que compõem a análise comparativa entre os modelos, também se determinou uma forma de quantificá-los. Com base nos aspectos positivos e negativos dos modelos, identificados na revisão da literatura sobre o assunto, 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 quer dizer que seu custo de aplicação ou tempo de modelagem sejam zero ou que não existam – mas, sim, que seu custo e tempo de modelagem são mais baixos em relação a outros modelos com pontuação superior, e vice-versa.

O Quadro 1 apresenta a quantificação estimada por Sales (2016) 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 representada, em todos os casos, na cor amarela.

#### 4. Considerações finais

É possível destacar alguns fatores fundamentais 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. 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.

Os fatores internos de projeto estão sob o domínio direto do projetista, pois seus efeitos sobre o favorecimento da qualidade interna do ar dependem das suas tomadas de decisão. Assim, a análise desses fatores auxilia na adoção de ações e diretrizes de projeto que os modifiquem, no sentido de maximizar a qualidade do ar no edifício. Dessa forma, esses fatores estão relacionados com a eficiência da ventilação natural em favorecer níveis adequados de qualidade do ar, com vistas à saúde dos ocupantes. O Quadro 2 apresenta os fatores externos e internos ao projeto destacados neste capítulo.

**Quadro 2:** Fatores Externos ao Projeto e Fatores Internos ao Projeto com relação à QIA – Saúde Humana

Fatores Externos ao Projeto	Fatores Internos de Projeto
Características do Clima: análise do clima local e microclima do sítio.	Uso e Localização do Ambiente: análise das variáveis de projeto quanto ao zoneamento dos ambientes em função da QIA.
Características de Ocupação e Atividades Desenvolvidas no Entorno: análise das variáveis relacionadas com a geração e presença de contaminantes do ar decorrentes do entorno.	Aberturas para Ventilação: análise das variáveis de dimensionamento, posicionamento e distribuição das aberturas em função da necessidade estimada de remoção de poluentes.
Composição das Superfícies do Entorno: análise das variáveis relacionadas com o tipo de material da superfície do solo no entorno (ex.: vegetação, asfalto, solo exposto, etc.).	Materiais Construtivos: identificação do tipo de material que melhor se adéque às necessidades de QIA em cada ambiente.

Fonte: Elaboração dos autores (2016).

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-se: os fatores climáticos globais e locais; a densidade de ocupação, rugosidade e relação W/H dos edifícios no entorno; a forma dos edifícios no entorno; e barreiras de vento no entorno. Os 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. Nestes, estão

compreendidos: 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 (Quadro 3).

**Quadro 3:** Fatores Externos ao Projeto e Fatores Internos ao Projeto que compõem os diagramas de análise da ferramenta proposta com relação à QIA – Conforto Térmico

Fatores Externos de Projeto	Fatores Internos de Projeto
Fatores Climáticos Globais e Locais	Posicionamento, Orientação e Forma do Projeto.
Densidade de Ocupação, Relação W/H, Forma dos Volumes Construídos e Rugosidade do Entorno	Posicionamento, Tamanho e Distribuição das Aberturas
Barreiras de Vento	Divisões internas e Profundidade da Planta dos Ambientes
	Elementos de Captação e Controle da Ventilação

Fonte: Elaboração dos autores (2016).

Conhecendo os principais fatores a serem considerados nas ferramentas de cálculo da ventilação natural, o projetista deve aplicar a ferramenta que mais se aproxima dos objetivos estabelecidos. Os modelos macroscópicos, por suas características, usualmente são capazes de considerar um número reduzido desses fatores – que pode ser suficiente em certos casos. Por outro lado, é possível inserir quase a totalidade dos fatores apresentados nos modelos microscópicos, obtendo-se um diagnóstico mais completo e detalhado da situação.

Com base no exposto neste capítulo, percebe-se a importância e a complexidade envolvidas no estudo da ventilação natural no espaço construído. Destaca-se que as exigências sobre a qualidade e eficiência do espaço construído são assuntos cada vez mais presentes no desenvolvimento de projetos no Brasil – tornando crescente, também, a incorporação de ferramentas de auxílio ao projetista. Esta breve abordagem do assunto possibilita a visualização e compreensão geral das ferramentas de simulação da ventilação natural com maior utilização no mercado e na academia. No entanto, o surgimento de novas ferramentas computacionais pode, em um futuro breve, tornar a análise da ventilação natural uma ação cada vez mais fácil e mais próxima das etapas iniciais do processo de projeto.

### Referências

ALLARD, Francis (Ed.). *Natural ventilation in buildings*. London: James & James, 2002.

AWBI, Hazim. *Ventilation of buildings*. London: E & FN Spon, 1991.

AXLEY, James. Analytical methods and computing tools for ventilation. In: SANTAMOURIS, Matthaios; WOUTERS, Peter (Ed.). *Building ventilation: the state of the art*. London: Earthscan, 2006. Cap. 2. p. 39-106.

AXLEY, James. Multizone airflow modeling in buildings: history and theory. *HVAC& Research*, v. 13, n. 6, p. 907-928, 2007.

CARDINALE, Nicola; MINUCCI, Massimo; RUGGIERO, Francesco. Analysis of energy saving using natural ventilation in a traditional Italian buildings. *Energy and Buildings*, v. 35, p. 153-159, 2003.

CHEN, Qingyan. Ventilation performance prediction for buildings: a method overview and recent applications. *Building and Environment*, v. 44, p. 848-858, 2009.

DOLS, William. A tool for modeling airflow & contaminant transport. *ASHREA Journal*, v. 43, n. 3, p. 35-43, 2001.

DOLS, William S.; EMMERICH, Steven J. LoopDA – natural ventilation design and analysis software. NISTIR 6967 - *National Institute of Standards and Technology*, 2003. Disponível em: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build03/PDF/b03062.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2014.

DRACH, Patrícia; VASCONCELLOS, Virgínia; CORBELLA, Oscar. *Desenvolvimento de experimentos didáticos para visualização de vento: simulação experimental em túnel de vento e simulação computacional*. Anais... ECACE/ENLACAC, Canela, 2010.

EMMERICH, Steven; DOLS, William; AXLEY, James. *Natural Ventilation Review an Plan for Design and Analysis Tools*. NISTRIR 6781. Prepared for Architectural Energy Corporation Boulder, Colorado, 2001.

ETHERIDGE, David; SANDBERG, Mats. *Building ventilation: theory and Measurement*. John Chichester, UK: Wiley and Sons, 1996.

FARIA, Luciano. *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*. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade de Cardiff, País de Gales. 2012.

FEUSTEL, Helmut; SMITH, Bill. *COMIS 3.0 – User’s Guide*. Lawrence Berkley National Laboratory. California, 1998. Disponível em: <http://epb.lbl.gov/comis/>. Acesso em: 07 ago. 2014.

FISK, William. Estimates of potencial nationwide productivity and health benefits from better indoor environments: an update. In: SPENGLER, J. D.; SAMET, J.; MCCARTHY, J. F. (Ed.). *Indoor Air Quality Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2001. Cap. 4.

FITZGERALD, Shaun; WOODS, Andrew. The influence of stack on flow patterns and stratification associated with natural ventilation. *Building and Environment*, v. 43, n. 10, p. 1719-1733, 2008.

HEISELBERG, Per; MURAKAMI, Shin; ROULET, Claude-Alain. *Ventilation of Large Spaces in Buildings*; analysis and prediction techniques. Energy Conservation in Buildings and Community Systems – IEA, Annex 26, 1998.

LIDDAMENT, Martin. *Air infiltration calculation techniques – an applications guide*. Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), 1986.

SALES, Gustavo. *Relatório Técnico de Avaliação de Conforto Térmico e Ventilação Natural Centro de Visitantes Flutuante ICMBio – Rio Negro/AM*. QUALI-A Consultoria Ambiental, 2013.

SALES, Gustavo de Luna. *Diagrama de ventilação natural: ferramenta de análise do potencial da ventilação natural no estudo preliminar de projeto*. 2016. 217 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SANTAMOURIS, Matthaios; WOUTERS, Peter (Ed.). *Building Ventilation: the state of the art*. London: Earthscan, 2006.

SANTAMOURIS, Matthaios. Ventilation for comfort and cooling: the state of art. In: SANTAMOURIS, Matthaios; WOUTERS, Peter (Ed.). *Building ventilation: the state of the art*. London: Earthscan, 2006. p. 217-235.

SANTAMOURIS, Matthaios; DASCALAKI, D. Prediction Methods. In: ALLARD, F. (Ed.). *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. London: James & James, 2002. p. 63-156

SEPPANEN, O. The effect of ventilation on health and other human responses. In: SANTAMOURIS, Matthaios; WOUTERS, Peter (Ed.). *Building ventilation: the state of the art*. London: Earthscan, 2006. Cap. 2. p. 247-264.

SOUZA, Valéria Moraes Baldoino de. *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*. 2006. 260 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SPENGLER, John; SAMET, Jonathan; McCARTHY, John. (Ed.). *Indoor Air Quality Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2001.

SWAMI, Muthusamy; CHANDRA, Subrato. *Procedures for calculating natural ventilation airflow rates in buildings*. Flórida: Florida Solar Energy Center, 1987.

TOLEDO, Alexandre. *Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos: uma aplicação em Maceió/AL*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TOLEDO, Alexandre; PEREIRA, Fernando. 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.

WALTON, Gary; DOLS, William. *CONTAM User Guide and Program Documentation*. National Institute of Standards and Technology – NIST, U.S Department of Commerce, 2005.

# Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

Este livro aborda conceitos, tecnologias e métodos relacionados aos aspectos energético, higrotérmico e lumínico, apresentando como pano de fundo o uso de programas de simulação computacional, diagramas e ferramentas simplificadas para estudos analíticos, aplicados ao espaço construído em diferentes climas. Na primeira parte do livro, “*Inputs* – conforto, vento e luz”, o Capítulo 1 apresenta a ferramenta alemã de simulação computacional ENVI-met e o seu potencial na análise do microclima urbano; o Capítulo 2 mostra as variáveis climáticas e os arquivos climáticos utilizados nas simulações higrotérmica; o Capítulo 3 aborda os programas de simulação aplicados à ventilação natural; e o Capítulo 4 trata da complexidade dos estudos de iluminação e a necessidade de avaliar várias dimensões, simultaneamente. Na segunda parte, “*Outputs* – ambiente construído e energia”, o Capítulo 5 ensina a identificar o potencial de aproveitamento das envoltórias para integrar sistemas de geração de energia; o Capítulo 6 traz a análise de uma casa pré-fabricada de balanço energético nulo; e o Capítulo 7 insere, à guisa de conclusão, uma visão sistêmica sobre o uso da energia elétrica no país. O livro dialoga com diversos perfis profissionais, pois contempla temas atuais e inovadores para estudantes e profissionais de Arquitetura, Engenharia, Geografia, Planejamento Urbano e áreas relacionadas com a qualidade e sustentabilidade do ambiente construído.



EDITORA



**UnB**