

## **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CONFORTO TÉRMICO EM ESCOLAS NATURALMENTE VENTILADAS**

**Adams Rackes (1); Raphaela Walger da Fonseca (2); Elisa de Oliveira Beck (3); Veridiana Atanasio Scalco (4); Gustavo Daou Palladini (5); Roberto Lamberts (6)**

(1) Engenharia Arquitetural, Doutorado da Drexel University em intercâmbio no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, aer37@drexel.edu

(2) Arquiteta, Pós-doutoranda do Programa de PósARQ/UFSC, raphawf@gmail.com

(3) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, elisabeck@gmail.com

(4) Arquiteta, Pós-doutoranda do Programa de PósARQ/UFSC, veridi@gmail.com

(5) Acadêmico Engenharia Civil/UFSC, gustavopalla@gmail.com

(6) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, roberto.lamberts@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Cx Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 5184

### **RESUMO**

A ventilação natural é uma das estratégias bioclimáticas que possibilita o conforto ambiental interno em diferentes climas. A existência de projetos padronizados para todo o território nacional pode não favorecer o aproveitamento máximo deste recurso, ao desconsiderar as interações entre características do edifício e características climáticas. O objetivo desta pesquisa é avaliar o potencial de conforto térmico em um protótipo de escola naturalmente ventilada nas zonas bioclimáticas 1, 3 e 8 representando uma zona de clima frio, uma de clima ameno e outra de clima quente. O método aplicado envolveu as seguintes etapas: i. escolha do projeto a ser avaliado; ii. definição das zonas bioclimáticas; iii. definição dos parâmetros construtivos a serem variados para dois casos representando o melhor desempenho esperado (caso 1) e o pior (caso 2); iv. modelagem e simulação do protótipo; e v. tabulação e análise dos resultados. Através das simulações dos dois casos para as três cidades observou-se, como esperado, que os resultados obtidos para o caso 1 foram mais favoráveis em relação ao caso 2. O caso 1 apresentou resultados positivos em relação à análise de conforto. Mesmo em climas quentes como Salvador, as temperaturas operativas situaram-se na zona de conforto em quase todas as horas do ano apenas com o uso do ventilador. Este resultado indica que o uso do condicionamento de ar não seria sempre necessário em climas quentes e úmidos, permitindo a redução no consumo de energia enquanto se mantém condições confortáveis para os estudantes.

Palavras-chave: ventilação natural, simulação computacional, desempenho térmico, escolas.

### **ABSTRACT**

Natural ventilation is one of the bioclimatic strategies that can help provide comfortable indoor thermal conditions in a variety of climates. The development and use of standard building designs and constructions for the entirety of Brazil may not favor the maximum use of this resource, in that it fails to consider the interactions between building and climate characteristics. The objective of this research is to evaluate the potential for thermal comfort in a prototype naturally ventilated school in bioclimatic zones 1, 3 and 8, representing cold, mild, and hot climate zones. The investigation had the following steps: i. choice of design to be evaluated; ii. definition of bioclimatic zones; iii. definition of construction parameters varied to create two cases representing the best expected performance (case 1) and the worst (case 2); iv. modeling and simulation of the both cases of the prototype; and v. tabulation and analysis of results. The results confirmed that the case 1 building had better thermal performance than the case 2 version. Indeed, in the case 1 school, even in very warm climates such as Salvador, the operative temperatures remained in the comfort zone throughout the year, with only moderate assistance from ceiling fans for air circulation. This result indicates that use of the air conditioning is rarely necessary even in hot climates, allowing savings in energy consumption while maintaining comfortable conditions for students.

Keywords: natural ventilation, computer simulation, thermal performance, schools.

## 1. INTRODUÇÃO

A ventilação natural de edifícios possui importância vital na oxigenação e higienização dos ambientes. Neste sentido, os Códigos de Obras das cidades brasileiras determinam valores mínimos de área de abertura para garantir a renovação de ar.

De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005a), a grande maioria das cidades brasileiras necessitam da estratégia de ventilação natural na maior parte das horas do ano. A ventilação é uma importante estratégia bioclimática para se obter conforto térmico nas edificações através da redução de temperaturas internas quando elevadas. Alcançando níveis agradáveis de temperatura interna, o uso de sistemas artificiais de condicionamento de ar pode ser minimizado, promovendo a redução no consumo de energia. Os percentuais de horas anuais com indicação para utilização da ventilação natural variam de 6,8% para Curitiba/PR a 88,8% para Belém/PA (LAMBERTS *et al.*, 2014). Já os dados para os meses de verão variam de 19,9% a 93,1% para as mesmas cidades citadas (LAMBERTS *et al.*, 2014).

Nesse sentido, uma das possibilidades de se economizar energia é utilizar a ventilação natural combinada a ventiladores de teto para evitar o acionamento do ar condicionado. A pesquisa realizada por De Vecchi *et al.* (2013) analisou o efeito da utilização de ventiladores de teto sobre o conforto térmico em salas de aula em clima quente e úmido. Os resultados obtidos apontaram uma preferência por velocidades do ar mais elevadas, superiores às normas internacionais e nacionais. Este dado reforça o potencial de ampliar o limite superior da faixa de conforto térmico, possibilitando mais horas de conforto sob temperaturas elevadas mediante o uso de ventiladores de teto.

De acordo com De Vecchi *et al.* (2015), limites mais altos relacionados à velocidade do ar foram incorporados pela ASHRAE 55 (2013). No entanto, os autores ressaltaram que os limites inferiores de aceitabilidade térmica para temperaturas consideradas mais elevadas permaneceram sem discussão. Através da análise de dados coletados em salas de aula, apresentou-se um percentual significativo de aceitabilidade térmica abaixo dos limites propostos pelo modelo adaptativo, o que serviu de base para a sugestão de ampliação dos limites inferiores através de uma “zona ajustada pelo índice clo”, ou seja, pelo acréscimo de vestimentas.

A ventilação natural tem um papel fundamental na manutenção da qualidade do ar. Tendo em vista a avaliação dos efeitos da ventilação natural em salas de aula através da área de abertura das janelas, Wang *et al.* (2014) desenvolveram um estudo que mostrou a importância deste recurso para evitar concentrações elevadas de CO<sub>2</sub>, e controlar as perdas de calor de acordo com a área ventilada.

Buscando avaliar o potencial de conservação de energia, qualidade do ar e conforto térmico de espaços naturalmente ventilados, Schulze e Eicker (2013) desenvolveram simulações computacionais com o programa EnergyPlus, fixando as taxas de ventilação conforme a área de abertura com o objetivo de avaliar o efeito da localização das aberturas e sua geometria. A partir dos estudos realizados, os autores destacaram a necessidade de controle das aberturas, a fim de evitar o resfriamento excessivo ou intensificar a entrada de ar fresco nas estações quentes, mantendo-se as faixas de conforto térmico sem a utilização de equipamentos de ar condicionado.

Apesar dos diferentes benefícios citados, a estratégia da ventilação natural por vezes é pouco considerada e valorizada se a edificação possui equipamentos de ar condicionado. Particularmente em edificações de uso escolar, esta estratégia pode ser feita geralmente com a simples abertura das janelas da edificação ou com o uso de ventiladores de teto, provocando ventilação mecânica no interior das salas, aumentando a circulação de ar e, conseqüentemente, aumentando as horas de conforto dos seus usuários.

A adoção de projetos padronizados é comum em função da redução de custos e ocorre em diversos setores ligados ao governo, como educação, saúde, habitação, entre outros. Apesar dessa vantagem, a uniformização possivelmente não favorecerá o aproveitamento máximo das estratégias bioclimáticas, principalmente em relação à orientação mais favorável dos ventos predominantes, que varia de uma cidade para outra. Além disso, outros aspectos que não deveriam ser iguais e influenciam no conforto ambiental dos edifícios de acordo com a região são as propriedades térmicas dos materiais e as características das aberturas, como área e tipo de vidro.

Tendo em vista os aspectos descritos acima, esta pesquisa baseia-se na avaliação do conforto térmico em ambientes escolares padronizados para três zonas bioclimáticas brasileiras. Utilizou-se para o estudo um projeto padrão da FNDE - Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação.

## 2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é avaliar o potencial de conforto térmico de um protótipo de escola naturalmente ventilada em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras.

### 3. MÉTODO

O método adotado estrutura-se em cinco etapas: i. escolha do projeto a ser avaliado; ii. definição das zonas bioclimáticas; iii. definição dos parâmetros construtivos a serem variados para dois casos representando o melhor desempenho esperado (caso 1) e o pior (caso 2); iv. modelagem e simulação do protótipo e; v. tabulação e análise dos resultados.

#### 3.1. Projeto avaliado

Para o desenvolvimento da pesquisa, escolheu-se um modelo de escola de uma sala de aula, descrito segundo os projetos padronizados de construção de escolas do FNDE (Figura 1). Desse projeto, foram obtidos os valores de áreas dos ambientes, percentual de abertura, ocupação e equipamentos.

Nessa tipologia de escola, a edificação é composta por um ambiente aberto, um hall de entrada de 12,59 m<sup>2</sup> e cinco ambientes fechados, sendo estes uma sala de aula para 27 alunos com 35,00 m<sup>2</sup>, banheiro masculino e banheiro feminino, ambos com 2,21 m<sup>2</sup>, cozinha com 8,51 m<sup>2</sup> e uma sala administrativa também com 8,51 m<sup>2</sup>, totalizando 62,02 m<sup>2</sup> de área total. A altura do pé direito é de 2,75 m.

Figura 1 – Planta baixa do protótipo da escola rural.



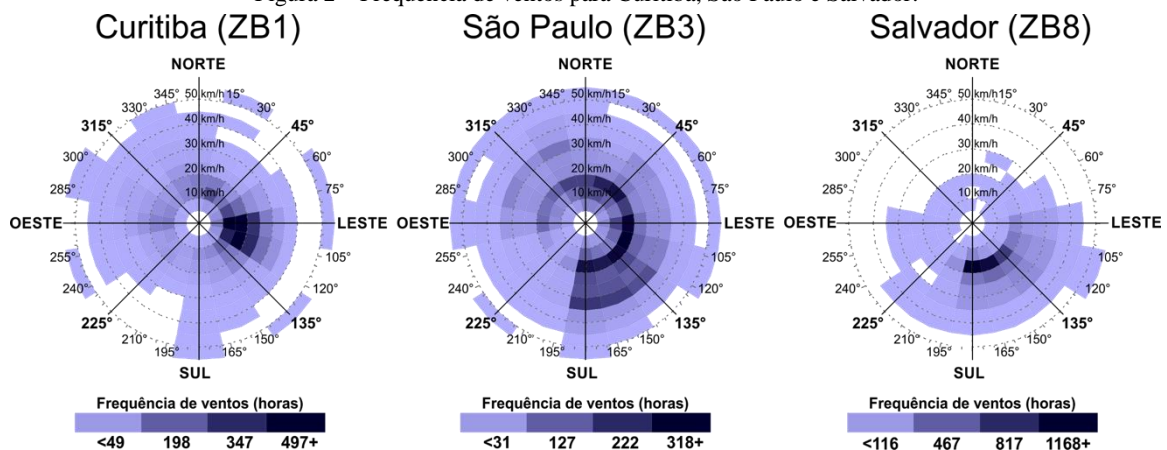
Fonte: Projetos Padrão Construção de Escolas FNDE (2011).

#### 3.2. Zonas bioclimáticas avaliadas

Para a análise, adotaram-se as Zonas Bioclimáticas 1, 3 e 8, por representarem as zonas que possuem climas extremos (frio e calor) no território nacional e um clima intermediário. Dessas zonas, foram escolhidos os arquivos climáticos do tipo \*.TRY para Curitiba, São Paulo e Salvador.

Os dados bioclimáticos das cidades avaliadas foram detalhados a partir do programa computacional de análise de arquivos de dados meteorológicos Autodesk Ecotect Analysis (2011). Analisando os gráficos da Figura 2 nota-se que a distribuição das direções dos ventos é mais variada em Curitiba e São Paulo do que em Salvador. Em Salvador a direção dos ventos está mais concentrada nos quadrantes Leste e Sul. Em relação à frequência de ocorrência, Salvador apresenta maior frequência do que as outras cidades.

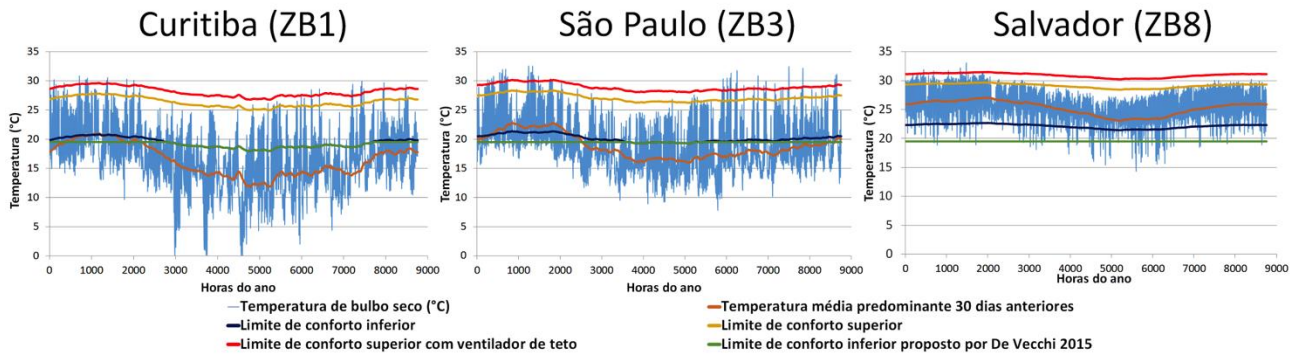
Figura 2 – Frequência de ventos para Curitiba, São Paulo e Salvador.



Fonte: Elaborado com base no programa Autodesk Ecotect Analysis (2011).

Na Figura 3 pode-se observar os dados de temperatura retirados dos arquivos climáticos do tipo \*.TRY. Neles foram plotados os limites superiores e inferiores de conforto, considerando o conforto adaptativo (ASHRAE, 2013). Acima do limite superior encontra-se o limite possível através do uso do ventilador de teto e o limite em verde corresponde ao proposto por De Vecchi *et al.* (2015) considerando a adaptação através do índice clo.

Figura 3 –Dados de temperatura dos arquivos climáticos do tipo \*.TRY contendo os limites de conforto inferior e superior.

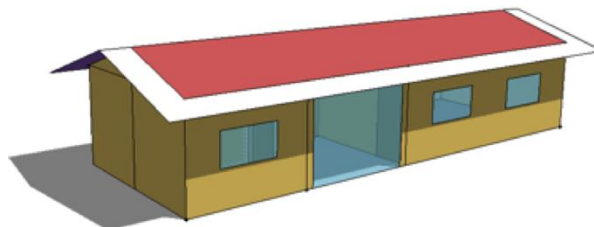


Fonte: Elaborado com base no arquivo climático do tipo \*.TRY.

### 3.3. Modelagem e simulações da edificação

A modelagem do edifício foi feita no programa OpenStudio (versão 1.7) e a simulação no EnergyPlus (versão 8.3). Sete zonas térmicas foram definidas: as seis visíveis na planta da Figura 2, mais o ático da cobertura, o seja, a área entre a laje do teto e logo abaixo do telhado. Na Figura 4 pode-se verificar a forma exterior do modelo tridimensional da escola analisada.

Figura 4 – Perspectiva do modelo.



Adotou-se um modelo multizonal para simular ventilação natural - *Airflow Network*. Num modelo desse tipo, cada ambiente se representa como um “nó” vinculado por percursos de fluxo de ar que atuam pela diferença de pressão. Essas relações formam um sistema de equações que deve ser solucionado interativamente em cada *timestep*. É importante destacar que esse tipo de modelo não simula a velocidade nem inércia do ar. Para os coeficientes de pressão de vento utilizou-se o padrão para edifícios *lowrise* definido por Swami e Chandra (1987). Os parâmetros dos percursos de fluxo foram selecionados através de um guia para modelagem multizonal que apresenta dados dos componentes construtivos medidos (Persily e Ivy, 2001).

Destacam-se também os cuidados na modelagem da transferência de calor do solo, pois é um aspecto que influencia consideravelmente os resultados das edificações naturalmente ventiladas. Para cada caso e em cada clima, foram feitas simulações para estabelecer as temperaturas médias mensais do ar interno. Em seguida essas temperaturas foram usadas como entradas da rotina de pré-processador *slab* (laje) do EnergyPlus.

Utilizaram-se padrões construtivos comumente verificados no país. Para a alvenaria de vedação considerou-se parede de tijolos com 6 furos, de 9 cm de espessura, reboco interno e externo de argamassa com 2,5 cm de espessura (sujeito às modificações para variar massa térmica descritas no item 3.4). O valor da transmitância da parede foi de 2,46 W/m<sup>2</sup>K.

A cobertura apresentou-se como um telhado inclinado, composto de telhas cerâmicas e uma laje de concreto maciço de 10 cm. A transmitância da cobertura é de 2,05 W/m<sup>2</sup>K. Para conformar o modelo mais

próximo do real, foi modelada uma câmara real, o chamado ático, como zona térmica abaixo do telhado. A laje maciça foi localizada abaixo do ático.

As aberturas foram estimadas pelas dimensões da fachada e através das imagens das perspectivas disponíveis no manual. O percentual total das aberturas considerando todas as fachadas corresponde a 9%. Os vidros utilizados foram vidros simples de 3 mm, com fator solar de 0,87.

Com relação ao uso e às cargas internas da edificação, o projeto mostra a possibilidade de lotar 27 pessoas na sala de aula, sendo 26 alunos e um professor. A densidade de potência de iluminação utilizada foi de 13,0 W/m<sup>2</sup>. Também foi incluído um computador na sala de aula e um na sala da administração. Na cozinha, foram colocadas cargas de um refrigerador funcionando constantemente e um fogão usado por quatro horas pela manhã. A sala de aula foi ocupada das 7h às 18h, com redução da fração a 0,3 entre 12h e 13h30.

### 3.4. Parâmetros variados

Os parâmetros de simulação variaram para dois casos considerando a combinação que possivelmente resultaria no melhor (caso 1) e no pior caso (caso 2), de acordo com a Tabela 1. Foram alterados os dados de frações máximas da abertura das janelas, a orientação principal, a absorvância solar das fachadas externas, a presença ou não de uma camada reflexiva no ático em cima do teto, a massa térmica das paredes, e a presença ou não de um ventilador para a movimentação do ar. Os valores desses parâmetros para os dois casos foram escolhidos pelos seus impactos previsíveis sobre a temperatura interna, exceto para as orientações, em que as duas opções (L-O e N-S) foram simuladas para saber qual apresentaria melhores ou piores condições de conforto.

Para tanto, a melhor versão (caso 1) teve janelas capazes de abrir até 50% do tamanho do vão, orientação Leste-Oeste, absorvância baixa (0,3) para representar cores claras tanto das paredes quanto da cobertura. Além disso, admitiu-se emissividade baixa (0,2) no interior do ático para modelar uma camada reflexiva, cujo propósito foi diminuir o fluxo de calor da cobertura para o interior por meio de radiação de onda longa. Esta versão também teve uma capacidade térmica elevada (400 kJ/m<sup>2</sup>K) devido a paredes espessas. Por fim, incluíram-se ventiladores de teto. O efeito do ventilador não foi modelado no EnergyPlus, mas considerado através da ampliação da zona de conforto, como discutido no item 3.5.

Para o que seria o pior caso (caso 2), consideraram-se janelas que poderiam ser abertas até 20% do tamanho do vão, orientação Norte-Sul, e absorvância alta (0,9) para cores escuras de paredes e cobertura. Emissividade alta (0,9) no interior do ático indicou a ausência de uma barreira reflexiva à radiação de onda longa, e a capacidade térmica baixa (150 kJ/m<sup>2</sup>K) correspondendo às práticas construtivas típicas.

Tabela 1– Dados dos parâmetros variados.

Caso	Percentagem máximo da abertura de janelas [%]	Orientação	Absorvância solar externa (paredes e cobertura) [adimensional]	Emissividade térmica no interior do ático [adimensional]	Massa térmica das paredes [kJ/m <sup>2</sup> K]	Velocidade de ar [m/s]
1	50%	L-O	0,3	0,2	C <sub>T</sub> ~ 400 (espessura elevada)	0,9 (ventilador)
2	20%	N-S	0,9	0,9	C <sub>T</sub> ~ 150 (pouca espessura)	< 0,3 (sem ventilador)

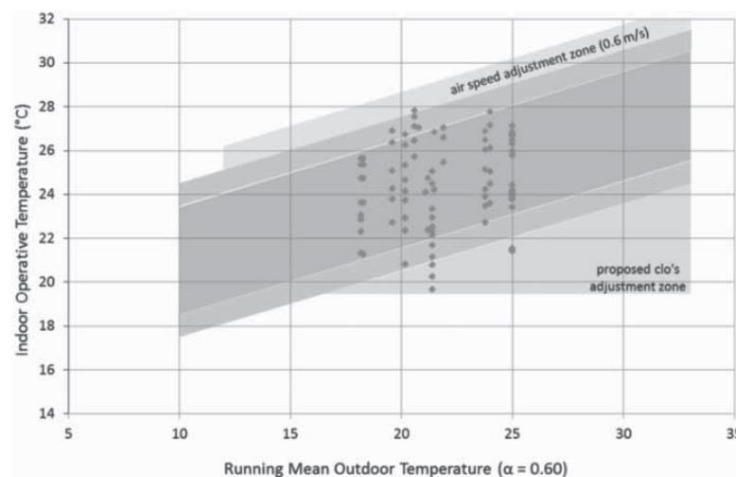
### 3.5. Modelo de conforto térmico

A ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) é uma norma amplamente utilizada para a avaliação do conforto térmico em edificações. Tal norma apresenta dois métodos para essa avaliação: um deles é o método estático criado a partir do modelo de Fanger. O outro é o modelo adaptativo, assim chamado por supor uma adaptação das pessoas ao lugar em que estão praticando suas atividades, devido aos ajustes corporais e ativos, principalmente pela possibilidade de alterar-se a vestimenta. O modelo adaptativo foi desenvolvido através de uma base de dados com respostas sobre conforto térmico em todo o mundo. Tal método é adequado para edificações naturalmente ventiladas e foi utilizado nesta pesquisa.

De acordo com o método do modelo adaptativo descrito na ASHRAE 55, calculou-se a temperatura média predominante do ar externo, T<sub>mpa(ext)</sub>, utilizando um período de 30 dias. A partir da T<sub>mpa(ext)</sub>, a temperatura operativa “ideal” que define o centro da faixa de conforto foi dada pela equação: 0,31 \* T<sub>mpa(ext)</sub> + 17,8 °C. Foram escolhidos os limites de conforto de 80% de aceitabilidade, calculados com 3,5 °C superior e inferior da temperatura operativa ideal. A Figura 5 mostra os limites admissíveis como função da T<sub>mpa(ext)</sub>.

Vale notar que, enquanto teoricamente temperatura operativa pode ter relação com a geometria e a posição de um ocupante dentro de um ambiente, o EnergyPlus segue a simplificação comum de calculá-la como média da temperatura radiante média (definida como média simples das temperaturas das seis superfícies de uma zona) e do ar.

Figura 5 – Limites de aceitabilidade de acordo com a ASHRAE Standard 55 (2013) com o ajuste proposto por De Vecchi *et al.* (2015). Nota-se que o ajuste por velocidade do ar utilizado neste trabalho foi superior ao ilustrado. *Running mean outdoor temperature* = temperatura média predominante do ar externo.



Fonte: De Vecchi *et al.*, 2015, baseado em ASHRAE, 2013.

Para o caso 1 estendeu-se o limite da faixa superior de conforto em 1,8°C, conforme o valor permitido pela ASHRAE 55-2013 com o auxílio de um ventilador que fornece velocidade de ar de 0,9 m/s, correspondente ao valor intermediário fornecido pela norma. Para as horas com temperatura abaixo do limite inferior, foi calculada a zona de conforto conforme a ASHRAE e também com o ajuste proposto por De Vecchi *et al.*, ilustrado na Figura 5.

Os resultados analisados restringem-se à sala de aula, representando a maior parte das horas de ocupação nesta escola. Foram excluídas como não letivas as datas entre o dia 21 de dezembro e 31 de janeiro, e do dia 15 de julho até 01 de agosto.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados do protótipo avaliado nos três climas são apresentados conforme avaliação ao longo do tempo (variação anual), frequência de ocorrência de condições relativas às trocas de ar e temperaturas comparadas a condições ideais de conforto e conforme as situações críticas anuais e mensais para o melhor e pior caso das tipologias construtivas.

### 4.1. Variação dos resultados ao longo do tempo

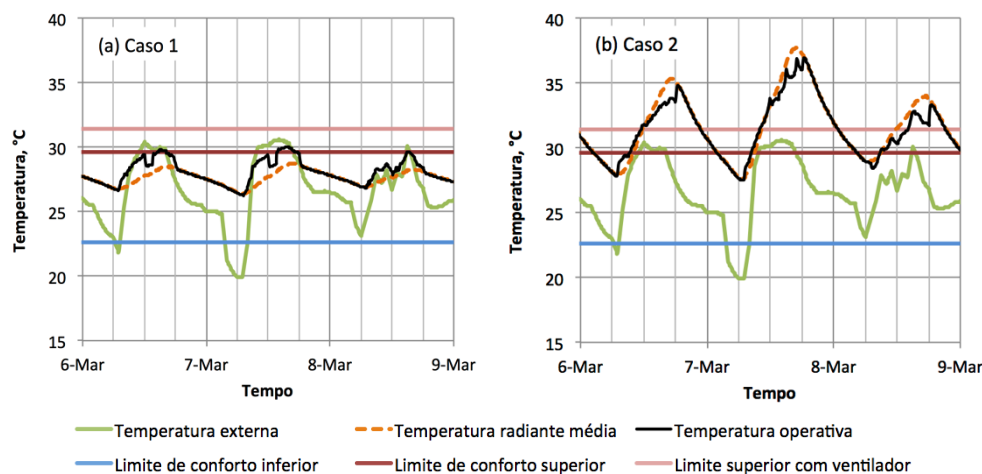
A avaliação do desempenho da edificação para os dois casos considerou um ano inteiro destacando-se as temperaturas externa, radiante média e operativa comparadas aos limites da zona de conforto. A Figura 6 ilustra os resultados para Salvador (ZB 8). Cabe ressaltar que São Paulo e Curitiba apresentaram resultados com tendências similares.

Observando-se apenas a temperatura do ar, pode-se perceber que o caso 1 apresenta quase a totalidade das horas de ocupação do ano dentro da faixa de conforto. Com o aumento do limite desta zona através do uso de ventiladores de teto, a sala de aula analisada apresenta todas as horas do ano dentro dos limites da zona de conforto. Já para o modelo utilizado no caso 2, devido à baixa inércia térmica, a temperatura radiante média e operativa apresentaram valores fora da zona de conforto na maior parte das horas do ano, mesmo utilizando ventiladores de teto.

Destaca-se que no caso 2 as paredes possuíam absorvância mais elevada e massa térmica inferior ao caso 1. Esta composição levou ao aumento da temperatura de forma acumulativa, pois o ambiente interno foi mais influenciado pela radiação incidente nas paredes. Neste sentido, o aumento da temperatura radiante somado à temperatura do ar resultou no aumento da temperatura operativa. Para este caso, a temperatura

radiante média foi bastante superior à temperatura externa, assim a edificação do caso 2 apresentou condições de conforto consideravelmente inferiores em relação ao ambiente externo.

Figura 6 – Desempenho das duas edificações, caso 1 (melhor desempenho esperado) e caso 2 (pior) em Salvador durante três dias quentes no início do mês de março. O limite inferior proposto por De Vecchi *et al.* seria constante à 19,5 °C.



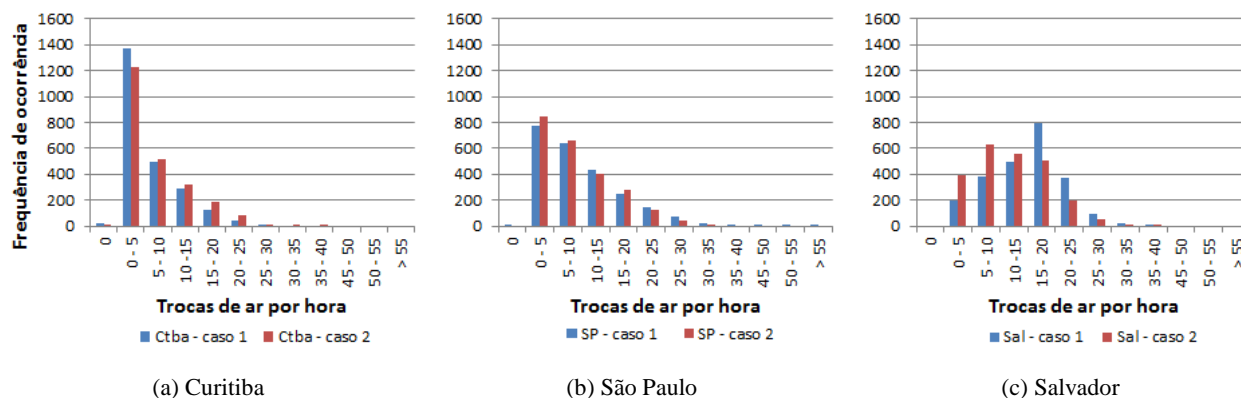
Por outro lado, a edificação do caso 1 apresentou desempenho superior devido ao favorecimento do atraso térmico e redução da absorvência da radiação incidente proporcionada pelas composições construtivas da sua envoltória. Estas características permitiram a inversão do fluxo de calor, fazendo com que as temperaturas internas elevadas fossem dissipadas em direção às paredes que apresentaram temperaturas inferiores. A temperatura radiante média foi expressivamente inferior à temperatura externa, dessa forma essa edificação permitiria melhores condições de conforto que o ambiente externo.

A adoção de ventiladores de teto aumentou o limite da faixa superior de conforto em 1,8°C. Esta variação permitiu que a edificação do caso 1, apresentasse todas as horas do ano dentro da faixa de conforto mesmo sem alteração da temperatura operativa.

## 4.2. Renovações de ar

Na Figura 7 observam-se os histogramas das renovações do ar durante todo o ano para as três cidades.

Figura 7 – Histogramas da renovação de ar das horas ocupadas para todo o ano nas três cidades analisadas.



O fator que mais influenciou foi a fração de horas do ano em que a abertura das janelas é desejável, uma vez que Curitiba e São Paulo possuem algumas horas nas quais as janelas devem ser fechadas a fim de evitar o desconforto por frio. Curitiba apresentou uma média de renovações de ar entre 6 e 7 horas; já São Paulo por volta de 9 e 10 horas. Quanto à frequência de ocorrência, tanto para Curitiba, quanto para São Paulo, a maior ocorrência de trocas de ar pode ser observada entre 0 a 5 renovações, enquanto Salvador teve uma distribuição mais próxima à normal, com menos ocorrências nesta faixa.

Os casos 1 e 2 apresentaram distribuições muito similares tanto para Curitiba, quanto para São Paulo. No caso 1, as distribuições indicaram quantidade de trocas de ar inferior, visto que devido aos climas mais

amenos, os ganhos de calor ao longo do ano foram menores, reduzindo a necessidade de operação das janelas para resfriamento (abertura das janelas).

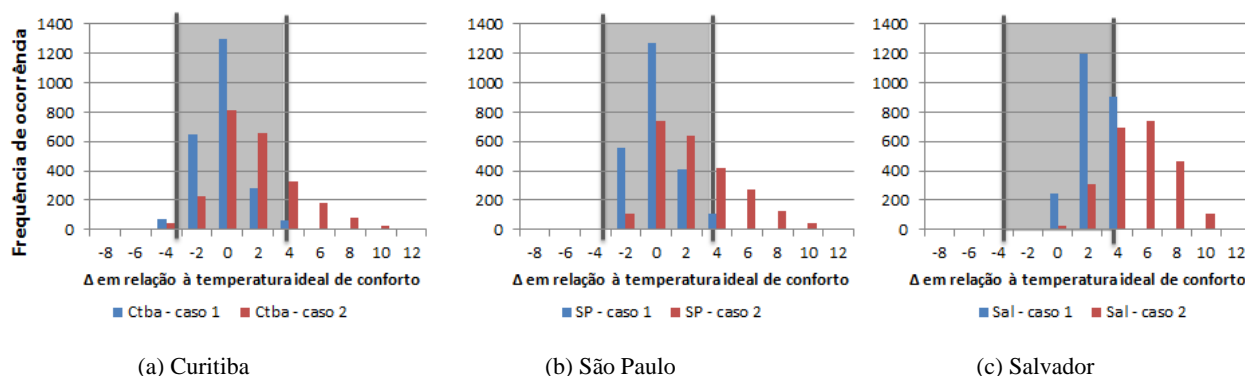
Por outro lado, Salvador, em que a quantidade de renovações foi geralmente mais elevada, pois as janelas permaneceram abertas por mais tempo, o caso 1 apresentou um maior número de trocas de ar se comparado ao caso 2. Apesar da diferença de densidade entre ar interno e externo devido à diferença de temperatura do caso 2 propiciar maior efeito de circulação do ar, a área de janelas operáveis reduzida possibilitou, em média, menos trocas de ar.

### 4.3. Temperaturas de conforto

Na Figura 8 observam-se os histogramas (frequência de ocorrência) da diferença entre a temperatura operativa (Top) e a temperatura ideal de conforto, ou seja, a linha central da faixa do conforto adaptativo. Esta linha central e a zona de conforto mudam ao longo do ano de acordo com a temperatura média predominante do ar externo.

A zona de conforto com 80% de aceitabilidade, limitada a 3,5 °C acima e abaixo da temperatura ideal, foi identificada pela área em cinza apresentada nos gráficos da Figura 8. Estas áreas não consideram o limite estendido atribuído ao uso de ventilador, adotado como 1,8 °C acima do limite superior da zona de conforto, assumido velocidade igual à 0,9 m/s (ASHRAE, 2013).

Figura 8 – Frequência de ocorrência em relação à temperatura de conforto nos dois casos para as três cidades.



O caso 1 não apresentou horas de desconforto por calor para a cidade de Curitiba. Já o caso 2 apresentou uma quantidade significativa de horas em que se observa desconforto por calor, na maioria dos casos, 1°C ou 2°C acima do limite. Em ambos os casos existem poucas horas em que se pode indicar desconforto por frio. Entretanto, é importante ressaltar que para o caso 1 a média de sensação térmica encontra-se à esquerda do ponto central (0, neutro), em direção ao desconforto por frio, enquanto que o caso 2 encontra-se à direita. Os climas com estações de inverno e verão bem definidas podem ser explorados mais profundamente examinando o efeito individual dos parâmetros em relação à variação climática anual.

Para São Paulo, o caso 1 resultou em conforto térmico satisfatório ao longo de todo o ano, com a maioria das horas dentro da zona de conforto. Já o caso 2 apresentou uma grande quantidade de horas com desconforto por calor. O mês mais crítico, fevereiro, apresentou 43% das horas acima do limite de conforto. Forçando a movimentação do ar através do uso de um ventilador este percentual decresceu, entretanto permaneceu insuficiente, resultando em 23% das horas em desconforto.

Já em Salvador, o caso 1 também apresentou a maior parte das horas dentro da faixa de conforto, entretanto, a temperatura operativa mais elevada levou a média de sensação térmica para a porção direita do ponto central (0, neutro), em direção ao desconforto por calor. Neste caso, uma quantidade pequena de movimentação de ar através de ventiladores é suficiente para manter a temperatura operativa dentro da zona de conforto. Por outro lado, para o caso 2, entretanto, a maior parte das horas encontrou-se fora da zona de conforto (desconforto por calor).

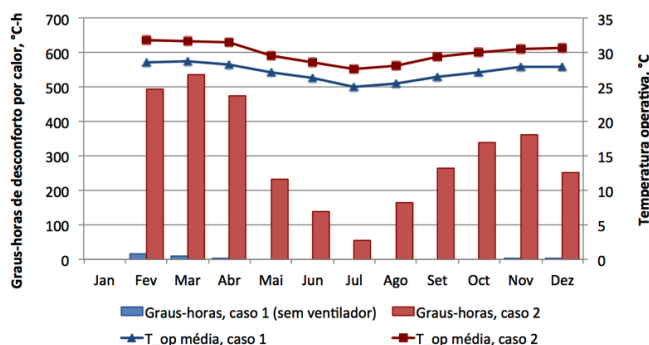
A Figura 9 compara os dois casos para a cidade de Salvador, mostrando a variação mensal tanto de graus hora de desconforto devido ao calor quanto da temperatura média operativa. Para esta análise tanto o caso 1, como o caso 2 foram avaliados sem o uso de ventilador de teto. A diferença das médias de temperaturas operativas entre os dois casos variou de 2,3°C (junho) a 3,1°C (fevereiro).

Para o caso 1, verificou-se que grande parte das horas, apesar de estarem dentro da zona de conforto, encontravam-se próximas ao limite de desconforto por calor. Estas mesmas horas deslocaram-se para fora da zona de conforto quando avaliada a tipologia do caso 2. A quantidade total de graus hora com desconforto



por calor do Caso 2 foi bastante significativa, visto que a ocupação mensal foi de 210-250 horas, com exceção de julho e dezembro em função das férias escolares.

Figura 9 – Graus-horas de desconforto e temperatura operativa média (nas horas ocupadas) em Salvador nos dois casos. Se mostra sem ventilador porque, com limite mais alto permitido com ventilador, caso 1 não tem horas de desconforto.



#### 4.4. Resultados anuais

Os efeitos já discutidos resultaram em padrões anuais bastante diferentes entre os dois casos (resumo na Tabela 2). A maior diferença foi relacionada ao calor, sobretudo para as temperaturas operativas e do ar, que foram significativamente maiores no caso 2 do que no caso 1, em todas as cidades, tanto para as médias mensais quanto para as médias anuais.

Tabela 2– Resultados para os casos 1 e 2 para cada cidade.

Resultados anuais	Curitiba Caso 1	Curitiba Caso 2	São Paulo Caso 1	São Paulo Caso 2	Salvador Caso 1	Salvador Caso 2
Média temperatura externa (°C) <sup>1</sup>	17,6	17,6	20,1	20,1	26,8	26,8
Média velocidade de vento (m/s) <sup>1</sup>	3,6	3,6	4,5	4,5	4,1	4,1
Média temperatura operativa (°C) <sup>2</sup>	21,5	23,5	22,7	25,1	27,2	30,0
Média renovações do ar (h <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	5,6	6,9	10,2	9,3	15,9	12,5
Média fração de abertura de janelas (-)	0,12	0,08	0,18	0,11	0,43	0,17
Porcentagem de horas ocupadas desconfortável por frio	6%	3%	1%	0%	0%	0%
Porcentagem de horas ocupadas desconfortável por frio (ajuste) <sup>3</sup>	6%	3%	1%	0%	0%	0%
Porcentagem de horas ocupadas desconfortável por calor	0%	14%	0%	22%	0%	64%
Graus-horas de desconforto por frio <sup>3,4</sup>	98	74	4	3	0	0
Graus-horas de desconforto por calor <sup>4</sup>	0	677	0	1074	0	3310
<b>Resultados: mês extremo</b>						
Pior mês: porcentagem de horas ocupadas desconfortável, frio	19%	14%	3%	2%	0%	0%
Pior mês: porcentagem de horas ocupadas desconfortável, calor	0%	44%	0%	43%	0%	81%

Notas:

1. Média simples durante horas ocupadas.
2. Média ponderada por ocupação, apenas sala de aula.
3. Com correção para baixas temperaturas, ver de Vecchi *et al.* (2015).
4. Total de 2354 horas ocupadas anuais

Em Curitiba, o caso 2 apresentou mais renovações de ar que o caso 1, visto que as temperaturas do ar interior mais elevadas aumentaram o número de horas em que as janelas necessitaram ser abertas para ventilação. Nos demais climas, devido ao padrão de temperaturas mais elevadas, tanto no caso 1, como no caso 2 as janelas permaneceram abertas por tempo semelhante, assim, a influência do tamanho das janelas foi preponderante (o caso 2 apresentou menos trocas de ar que caso 1).

Na edificação do caso 1 foi possível evitar completamente as horas desconfortáveis por calor nas três cidades. Para Salvador, fez-se necessário o uso de ventilador de teto para que 100% das horas de ocupação estivessem dentro da zona de conforto. Contudo, apenas 29 °C-h estariam fora da zona de conforto sem considerar o ventilador.

O caso 2 resultou em condições mais desfavoráveis em todos os climas, com efeito mais evidente nos climas mais quentes. O percentual de desconforto por calor foi de 14% para Curitiba, 22% para São Paulo, e 64% para Salvador. Este resultado foi ainda mais significativo no mês crítico (fevereiro), para as três

idades, onde 44% das horas ocupadas foram desconfortáveis para Curitiba, 43% para São Paulo, e 81% para Salvador.

Apenas Curitiba apresentou quantidade relevante de horas de desconforto por frio. O ajuste proposto por De Vecchi *et al.* (2015) não reduz esse percentual nos casos considerados. Embora o percentual de horas com desconforto por frio não seja grande durante todo o ano, foi significativo nos meses mais frios, variando entre 10% e 20% das horas ocupadas em junho, julho e agosto.

O edifício do caso 1, idealizado para apresentar melhor desempenho em climas quentes (com baixa absorção do envelope), em Curitiba resultou em mais horas de desconforto por frio. Neste sentido, maiores investigações seriam necessárias a fim de definir sistemas construtivos de edificações mais adequados à esta zona bioclimática. No entanto, é importante salientar que mesmo para este clima, a maior diferença entre o caso 1 e o caso 2 foi o aumento das horas de desconforto por calor.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o potencial de conforto térmico de um protótipo de escola naturalmente ventilada em três zonas bioclimáticas brasileiras.

Como discutido na introdução, a padronização de projetos, apesar de propiciar a redução de custos, muitas vezes não favorece a aplicação nas diferentes zonas bioclimáticas do país. Através das simulações dos dois casos para as três cidades observou-se, como esperado, que os resultados obtidos para o caso 1 foram mais favoráveis em relação ao caso 2. O caso 1 apresentou resultados bastante positivos em relação à análise de conforto. Mesmo em climas quentes como Salvador, as temperaturas operativas situaram-se na zona de conforto em quase todas as horas do ano com o uso do ventilador. Este resultado indica que o uso do condicionamento de ar não seria necessário, possibilitando a redução do consumo de energia.

Neste sentido, a escolha adequada dos componentes construtivos em projetos padronizados pode auxiliar a reduzir as diferenças de desempenho térmico das edificações, além de reduzir ou cessar a necessidade da utilização do condicionamento de ar.

O potencial de utilização da ventilação natural em escolas é grande de acordo com os resultados obtidos neste artigo. Salienta-se que nos meses mais quentes e no mês mais frio as escolas estão em férias ou recesso. Ou seja, nos meses do ano com extremos de temperatura, onde a ventilação talvez não fosse recomendável, seja pelo calor ou frio intenso, as escolas não seriam utilizadas.

Cabe ressaltar que outras pesquisas poderiam complementar os resultados apresentados variando o tipo de vidro, o tipo de proteção solar, as composições de abertura (de correr, guilhotina, com bandeira superior, etc.), e a própria localidade do edifício, considerando a existência do entorno edificado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.
- \_\_\_\_\_. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASHRAE (2013). ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning engineers. Atlanta, GA, EUA.
- DE VECCHI, R.; CÂNDIDO, C. M.; LAMBERTS, R. O efeito da utilização de ventiladores de teto no conforto térmico em salas de aulas com condicionamento híbrido em um local de clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, p. 189–202, 2013.
- DE VECCHI, R.; SORGATO, M. J.; PACHECO, M.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: the Brazilian case. **Architectural Science Review**, v. 58, n. 1, p. 93–101, 2015.
- FNDE (2011).
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. *Eficiência Energética na Arquitetura*. São Paulo: PW Editores. Edição revisada. 2014.
- PERSILY, A.K.; IVY, E.M., Input Data for Multizone Airflow and IAQ Analysis. National Institutes of Standards and Technology. NISTIR 6585, Gaithersburg, MA, EUA, 2001.
- SCHULZE, T.; EICKER, U. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, v. 56, p. 221–232, 2013. Elsevier B.V.
- SWAMI, M.V.; CHANDRA, S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow, **ASHRAE Trans.**, 243–266, 1988.
- WANG, Y.; ZHAO, F. Y.; KUCKELKORN, J.; *et al.* Classroom energy efficiency and air environment with displacement natural ventilation in a passive public school building. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 258–270, 2014. Elsevier B.V.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ELETROBRAS/PROCEL, CNPq e a Comissão Fulbright pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.