

# Ventilação natural e desempenho térmico sob diferentes configurações de aberturas em uma sala de aula

*Natural ventilation and thermal performance under different opening configurations in a classroom*

Érica Coelho Pagel 

Gilda Laysa de Oliveira Gouveia 

Ramon Silva Martins 

Marcos Vinícius Gualberto da Cruz 

## Resumo

**E**m áreas tropicais quentes, para evitar o estresse térmico, é comum a prática de que os edifícios escolares dependam do uso de sistemas de climatização mecânicos. A utilização de estratégias passivas de projeto, nessas regiões, em busca do conforto térmico com um baixo gasto energético, é de suma importância. Nesse sentido, as aberturas da edificação desempenham um importante papel, pois interferem na quantidade da radiação solar recebida e no padrão de distribuição do fluxo do ar interno. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho térmico em uma sala de aula sob diferentes configurações de modelos de janelas e portas em Vitória, ES, e Belém, PA. A metodologia utilizou simulações de desempenho térmico e de dinâmica dos fluidos computacional para análise da intensidade de desconforto térmico e do consumo energético. Os resultados mostram que a adição do peitoril ventilado aumenta a velocidade do ar na entrada da abertura e melhora significativamente o desempenho térmico na sala de aula. O uso de brise-soleil reduz em até 50% e 13% o consumo energético no ambiente, em Belém e Vitória, respectivamente. O estudo contribui para a seleção de aberturas mais eficientes, adaptadas às condições climáticas de cada região.

**Palavras-chave:** Desempenho térmico. Ventilação natural. Janelas. Simulação computacional.

## Abstract

*In school buildings located in hot tropical areas, it is a common practice to use mechanical climate control systems to avoid heat stress. The use of passive design strategies is of paramount importance for the achievement of thermal comfort with low energy consumption. Hence, buildings' openings play an important role, as they have an impact on the amount of solar radiation received and on the internal air flow distribution pattern. The objective of this study was to evaluate the thermal performance in classrooms with different window and door model configurations in Vitória/ES and Belém/PA, Brazil. Simulations of thermal performance were conducted to analyse the intensity of thermal discomfort and energy consumption, while the aid of Computational Fluid Dynamics tools enabled the verification of details of the air velocity and temperature fields. The results show that the addition of a ventilated sill increases air velocity at the inlet opening and significantly improves thermal performance in the classroom. The use of brise-soleil reduces energy consumption in the classrooms in Belém and Vitória by up to 50% and 13%, respectively. The study helps in the selection of more efficient openings, adapted to the climatic conditions of each region.*

**Keywords:** Thermal performance. Natural ventilation. Windows. Computer simulation.

<sup>1</sup>Érica Coelho Pagel

<sup>1</sup>Universidade Vila Velha  
Vila Velha - ES - Brasil

<sup>2</sup>Gilda Laysa de Oliveira Gouveia

<sup>2</sup>Instituto Federal do Norte de Minas  
Gerais  
Pirapora - MG - Brasil

<sup>3</sup>Ramon Silva Martins

<sup>3</sup>Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória - ES - Brasil

<sup>4</sup>Marcos Vinícius Gualberto da  
Cruz

<sup>4</sup>Universidade Vila Velha  
Vila Velha - ES - Brasil

Recebido em 12/11/21

Aceito em 16/02/22

## Introdução

O desconforto térmico em espaços de aprendizagem é um fator de impacto na qualidade do ambiente interno afetando o comportamento, a concentração e o desempenho dos alunos (LAU; ZHANG; TAO, 2019; WANG *et al.*, 2020). Em áreas tropicais quentes, como o Brasil, para evitar o estresse térmico, é comum a prática de que os edifícios escolares, tanto públicos quanto privados, dependam de sistemas mecânicos, tais como o uso de ar-condicionado (BUONOCORE *et al.*, 2020; DE ABREU-HARBICH; CHAVES; BRANDSTETTER, 2018; NODA *et al.*, 2020), que podem aumentar, significativamente, o consumo de energia (HOYT; ARENS; ZHANG, 2015).

Por outro lado, as principais estratégias defendidas por um desenho bioclimático, cujo objetivo é alcançar uma arquitetura de baixo consumo de energia nesses locais, são por meio do resfriamento passivo dos ambientes, incorporando uma adequada orientação do edifício (TIAN *et al.*, 2012), sombreamento das aberturas (SUBHASHINI; THIRUMARAN, 2018) e movimento permanente do ar interno por meio da ventilação natural (HERACLEOUS; MICHAEL, 2019; LIU; YANG; NIU, 2021; SUBHASHINI; THIRUMARAN, 2020).

Nesse sentido, as normas brasileiras NBR 15220 (ABNT, 2003) e NBR 15575 (ABNT, 2021) tratam do desempenho térmico de edificações a partir da divisão do território brasileiro em oito zonas, ditas com características climáticas similares, denominadas de zoneamento bioclimático. Entretanto, dada a extensão do território nacional e considerando o impacto do microclima urbano, muito se tem discutido sobre a possibilidade de aumentar a quantidade de zonas, o que levaria a uma redução nas divergências climáticas entre as cidades, e consequentemente à obtenção de diretrizes construtivas mais específicas para cada situação (MARTINS; BITTENCOURT; KRAUSE, 2012; RORIZ, 2012).

Essas normativas indicam, dentre outras diretrizes, que na zona tropical de clima quente e úmido – aquela que não apresenta rigor térmico nem para calor nem para frio, com umidade elevada; denominada zona bioclimática 8, as aberturas de ambientes de longa permanência devem atender no mínimo a 8% da área do piso (ABNT, 2021), além de priorizar o sombreamento delas. Destaca-se, portanto, a importância do aumento da área de abertura e do seu sombreamento no desempenho térmico do ambiente em áreas tropicais. Entretanto, diferentes configurações nesses elementos – forma, posição, se são fixos ou móveis, por exemplo, podem interferir na quantidade e no padrão de distribuição do fluxo do ar interno.

Sabe-se que a movimentação do ar aumenta a transferência de calor por convecção e a perda de calor por evaporação do corpo humano, evitando desconforto térmico devido à pele úmida, o que aumenta o resfriamento fisiológico, e, portanto, induz ao conforto térmico. Favarolo e Manz (2005) afirmaram que a posição vertical da abertura, ou seja, o fator entre a posição inferior e superior de uma abertura, é o parâmetro mais impactante na velocidade do ar interno; em contraste, a distância horizontal e a área da abertura na parede são de menor importância. Outro fato interessante sobre a melhoria do fluxo de ar interno é respeitar as diferentes proporções de tamanho e as elevações das aberturas de entrada e saída (SEIFERT *et al.*, 2006).

Nesse contexto, existem na literatura vários estudos sobre estratégias de ventilação natural, com o intuito de melhorar o conforto térmico em edifícios, em relação à localização e ao tamanho das aberturas (HASSAN *et al.*, 2007; PRAKASH; RAVIKUMAR, 2015). Entretanto, muito ainda se tem que investigar sobre a aplicação de diferentes configurações de aberturas no conforto térmico do ambiente, sobretudo tipologias existentes no mercado.

Em relação ao impacto desse dispositivo no edifício educacional, a padronização da arquitetura escolar, principalmente de edifícios públicos, a fim de facilitar sua implantação e reduzir os custos de construção e manutenção, pode ser um agravante, uma vez que, na maior parte das vezes, a mesma tipologia de janela é aplicada em contextos climáticos completamente diferentes. Em 2007 o governo brasileiro lançou o chamado Programa Proinfância para atender crianças de até 5 anos de idade com cinco tipos de empreendimentos – A, B, C, 1 e 2 – a serem construídos sob responsabilidade das prefeituras, com o objetivo de melhorar os índices de qualidade da educação básica por meio do investimento em infraestrutura (MINISTÉRIO..., 2019).

Até o ano de 2021, 7.679 unidades do programa foram acordadas em todo o território nacional, entre as diversas modalidades propostas, com 4.350 unidades concluídas (MINISTÉRIO..., 2021). Destas, 2.579 unidades são do Tipo B, cada uma planejada para atender, no máximo, 224 alunos. Por outro lado, embora o projeto de adaptação local esteja incluído nas recomendações, a variação arquitetônica é, de fato, pouco explorada; assim, na maioria dos casos, o mesmo projeto é implementado em diferentes cidades, independentemente do clima local, o que interfere no desempenho térmico desses espaços educacionais.

De forma a contribuir com o tema, o objetivo deste artigo foi investigar o impacto de diferentes configurações de aberturas – janelas e portas; no desempenho térmico de salas de aula com ventilação natural de um edifício do Programa Proinfância tipo B, localizadas em duas cidades da zona bioclimática 8: Vitória, ES, e Belém, PA.

O resultado de estudos que envolvem o comportamento das aberturas dos edifícios na qualidade ambiental pode auxiliar projetistas ainda na fase de desenvolvimento do projeto arquitetônico, na qual decisões fundamentais devem ser tomadas para conseguir uma ventilação natural eficiente no edifício.

## Método

Para investigação do impacto das configurações das aberturas no desempenho térmico de uma sala de aula na cidade de Vitória, ES, e Belém, PA, utilizou-se simulações computacionais por meio do software de desempenho termo energético DesignBuilder (DESIGNBUILDER, 2019). A calibração e validação foram conduzidas por meio de medições experimentais em um edifício escolar do Programa Proinfância tipo B localizado na Região Metropolitana da Grande Vitória.

Para análise do modelo nas duas cidades considerou-se quatro possibilidades de orientação – norte, sul, leste e oeste e a associação entre diferentes tipologias de aberturas, sendo essas:

quatro design de janelas – janela padrão do projeto original, adição de pivotante superior, adição de peitoril ventilado, adição de pivotante superior e peitoril ventilado;

- (a) o uso (ou não) de dispositivos de sombreamento e os padrões de uso e configurações da porta de acesso à sala – porta padrão aberta ou fechada;
- (b) porta com veneziana inferior e meia porta, com abertura superior, popularmente conhecida como porta baia; e
- (c) totalizando 256 simulações realizadas.

Adicionalmente, simulações de dinâmica dos fluidos computacional (DESIGNBUILDER, 2019) foram realizadas de forma a ilustrar o comportamento do escoamento do ar dentro do ambiente sob as diferentes configurações estudadas. O trabalho adotou quatro etapas metodológicas:

apresentação das condições climáticas das cidades estudadas;

- (a) descrição do modelo simulado;
- (b) experimento de campo e calibração do modelo; e
- (c) parâmetros de desempenho térmico adotados.

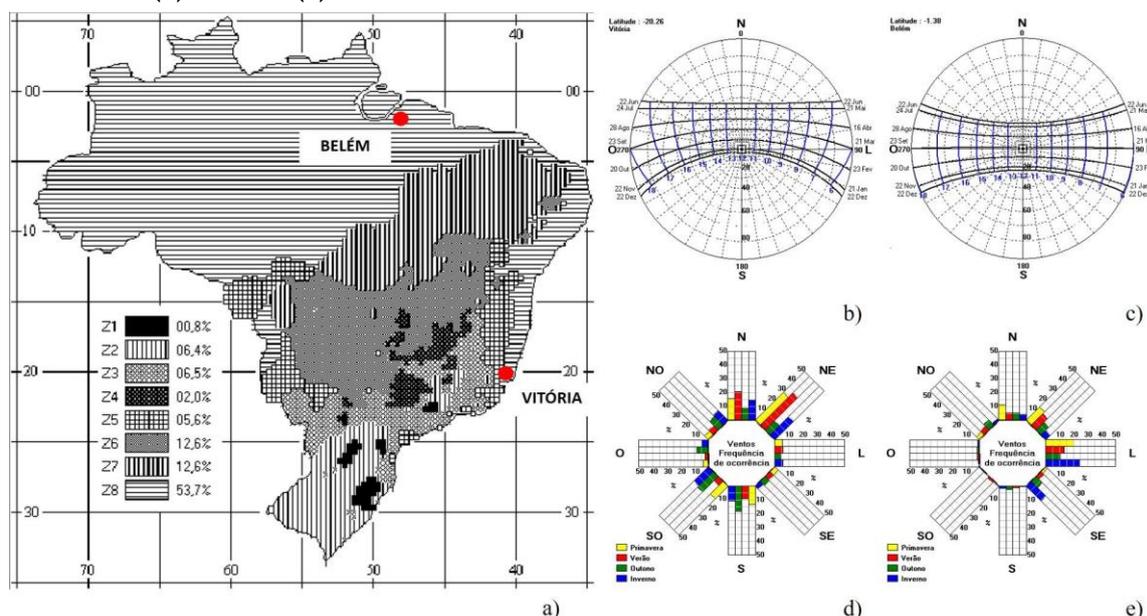
## As cidades de estudo

A zona 8 foi selecionada dada a importância do elemento janela na região, uma vez que em climas tropicais quentes e úmidos são priorizadas as estratégias de ventilação natural e sombreamento das aberturas para o desempenho térmico dos ambientes.

Por outro lado, as capitais investigadas foram escolhidas porque, embora se localizem na mesma zona bioclimática, apresentam algumas características geográficas e climáticas diferentes (Figura 1), o que pode contribuir tanto para a reflexão de um novo zoneamento bioclimático brasileiro, quanto para definições futuras de estratégias mais específicas, em relação ao aparato janela, em regiões similares.

Vitória, capital do Espírito Santo, localizada na Região Sudeste do país (Latitude 20°19'10" Sul e Longitude 40° 20' 17" Oeste), possui o maior complexo portuário do Brasil e uma população de 327.801 habitantes, sendo a quarta mais populosa do estado, integrando uma área com um intenso processo de urbanização denominada de Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), juntamente com os municípios de Cariacica, Fundão, Guarapari, Serra, Viana e Vila Velha, totalizando cerca de 1.687.704 habitantes (IBGE, 2010). É caracterizada por um clima tropical, com temperatura média mensal entre 21 °C e 26 °C, com as maiores temperaturas no período de verão, e umidade relativa do ar média mensal aproximadamente de 70%. A amplitude térmica fica aproximadamente entre 22,4 °C (junho) e 27,4 °C (fevereiro). Os ventos predominantes no município são no quadrante norte-nordeste, com velocidades de até aproximadamente 6 m/s na primavera e 7 m/s no verão. A ocorrência de chuvas se concentra, principalmente, entre os meses de outubro e janeiro, sendo que o município está entre as duas capitais brasileiras com menores índices de precipitação pluviométrica ao ano (1.252 mm/ano) (INSTITUTO..., 2021).

Figura 1 - (a) Zoneamento bioclimático brasileiro destacando a localização das cidades de Vitória, ES, e Belém, PA, na zona 8; carta solar da cidade de (b) Vitória e (c) Belém; rosa dos ventos de frequência da cidade de (d) Vitória e (e) Belém



Fonte: adaptado de (a) ABNT (2003) e (b), (c), (d) e (e) Analysis Sol-Ar (2021).

Belém, capital do Pará, localizada na Região Norte do país (Latitude  $01^{\circ} 27' 21''$  sul e Longitude  $48^{\circ} 30' 16''$  Oeste), é o município mais populoso do estado e o segundo da Região Norte, com uma população de 1.393.399 habitantes. Também sob um intenso processo de urbanização, integra a Região Metropolitana de Belém (RMB), juntamente com os municípios de Ananindeua, Benevides, Marituba, Santa Bárbara do Pará, Santa Izabel do Pará e Castanhal, com 2.275.032 habitantes (INSTITUTO..., 2010). A região possui clima equatorial, sofrendo forte influência da proximidade com a Floresta Amazônica e resultando na capital mais chuvosa do Brasil (2.889 mm/ano) sem período de seca. A temperatura média anual na região é de  $26,5^{\circ}\text{C}$ , chegando a  $27,1^{\circ}\text{C}$  em alguns períodos, somando mais de 2.234 horas de sol ao ano; com amplitude térmica baixa ( $25,8^{\circ}\text{C}$  (fevereiro) e  $27,1^{\circ}\text{C}$  (novembro) e umidade relativa do ar elevada acima dos 80%. O vento predominante na região é o leste, atingindo até aproximadamente 3 m/s em todas as estações do ano (INSTITUTO..., 2021).

Ambas as cidades contam com um clima considerado na maior parte do tempo quente e úmido e, portanto, apesar de estarem aproximadamente 2.275 km distantes entre elas, são classificadas na mesma zona bioclimática. Entretanto, além da diferença na amplitude térmica e na variação da umidade relativa de ambas, Belém, pela proximidade com a linha do Equador, possui um clima quase que homogêneo ao longo de todo o ano, de forma que a diferença entre as estações seja muito sutil. Por outro lado, em Vitória, ocorrem maiores variações, fazendo com que o verão seja a estação mais quente do ano, seguido do outono, da primavera e do inverno, que é a estação mais fria. Outra característica climática importante é em relação aos ventos, que se diferem em frequência e intensidade entre as regiões, apresentando maiores velocidades em Vitória quando comparado a Belém.

## Simulação computacional

O software DesignBuilder versão 6.1.0.006 (DESIGNBUILDER, 2019) foi usado para a simulação computacional do desempenho térmico e da dinâmica dos fluidos computacional. Além de ter uma interface amigável, o DesignBuilder usa o banco de dados de algoritmos do EnergyPlus para realizar simulações. O arquivo climático validado usado foi o ano meteorológico típico (TMY) com extensão EnergyPlus Weather (EPW) (LABORATÓRIO..., 2019), que corresponde à média mensal das condições meteorológicas de cada região de 2004 a 2018.

A sala selecionada para estudo possui uma janela externa e duas portas de acesso, sendo uma que permite o acesso à sala pelo interior da escola e outra que permite o acesso à sala pela área descoberta externa. No entanto, como recorte deste estudo e a fim de se investigar entrada e saída de ar em paredes opostas, foi considerado o impacto de diferentes configurações da janela externa e da porta de acesso à sala pelo interior

da escola, desconsiderando nas simulações o efeito da abertura ou diferentes configurações da porta que permite o acesso à área descoberta externa (Figura 2).

O modelo foi configurado de acordo com as dimensões do projeto original, os materiais de construção e as propriedades físicas e térmicas do ambiente. Alguns desses parâmetros são o número de usuários, tipo de atividade no ambiente, tempo de uso ou permanência, entre outros (Tabela 1). Em relação à configuração da entrada e saída de ar através das aberturas, foi adotada a condição de ventilação natural calculada, disponibilizada pelo software, baseada no arquivo climático no formato TMY.

Figura 2 - (a) Modelo tridimensional da edificação escolar do padrão Proinfância e (b) destaque para a sala e aberturas estudadas

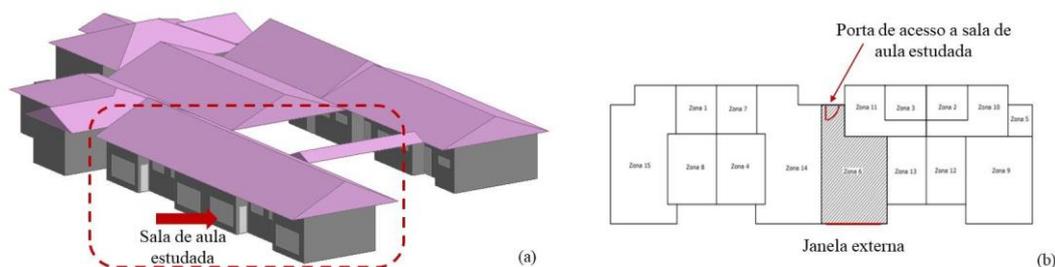


Tabela 1 - Parâmetros gerais para a configuração das simulações

<b>ENVOLTÓRIA</b>	
Paredes (0,14 m de espessura): tijolos com 8 furos quadrados (9 x 19 x 19) cm, emboço de 0,025 m	
Densidade de massa aparente do bloco cerâmico	1.600 kg/m <sup>3</sup>
Condutividade térmica do bloco cerâmico	0,90 W/(m.K)
Calor específico do bloco cerâmico	0,92 kJ/(kg.K)
Densidade de massa aparente da argamassa comum do emboço	2.000 kg/m <sup>3</sup>
Condutividade térmica da argamassa comum do emboço	1,15 W/(m.K)
Calor específico da argamassa comum do emboço	1,00 kJ/(kg.K)
Emissividade das paredes e piso (ε)	0,90
Absortância (α) das paredes e piso (α)	0,30
Cobertura (laje pré-moldada maciça de 0,1 m de espessura + telha de barro)	
Densidade de massa aparente do concreto	2.200 kg/m <sup>3</sup>
Condutividade térmica do concreto	1,75 W/(m.K)
Calor específico do concreto	1,00 kJ/(kg.K)
Densidade de massa aparente da telha de barro	2.000 kg/m <sup>3</sup>
Condutividade térmica da telha de barro	1,05 W/(m.K)
Calor específico da telha de barro	0,92 kJ/(kg.K)
Vidro incolor das janelas (0,006 m de espessura)	
Transmitância térmica do vidro incolor	5,77 W/(m .K)
Moldura das janelas em alumínio	
Transmitância térmica do alumínio	5,88 W/(m .K)
<b>AMBIENTE E USUÁRIOS</b>	
Área da sala de aula selecionada	27,29 m
Total de ocupantes	12 alunos e 02 professores
Densidade de ocupação	0,51 pessoa/m
Rotina de ocupação das 7h00 às 11h00 e das 13h00 às 17h00	100%
Rotina de ocupação das 11h00 às 13h00 e das 17h00 às 07h00	0%
Vestimenta	Inverno: 1,00 clo; verão: 0,50 clo
Taxa metabólica referente aos alunos - atividade sedentária	50,0 W/pessoa
Iluminação artificial	10,26 W/m
Janelas consideradas abertas	7h00 às 17h00
Parte deslizante das janelas fechadas e o pivotante e peitoril ventilado de cada modelo abertos	17h00 às 7h00

Fonte: adaptado de Ministério da Educação (2021) e NBR 15220 (ABNT, 2003).

A sala de aula possui uma janela padrão (M1) composta por um único vidro e caixilharia de alumínio, com partes deslizantes e partes fixas baixas para permitir que as crianças vejam o espaço exterior. É uma configuração de janela comum adotada por escolas infantis no Brasil. O porta padrão é de madeira e não possui aberturas para permitir a ventilação natural quando está fechada.

Foram analisadas três outras configurações de desenho de janela, que aumentaram a área de ventilação natural da janela padrão:

- (a) acréscimo de janelas pivotantes de vidro único e caixilharia de alumínio (M2);
- (b) acréscimo de peitoril ventilado de concreto (M3); e
- (c) incorporação de ambas as estratégias – janelas pivotantes e peitoril ventilado (M4).

O peitoril ventilado é um dispositivo geralmente em forma de "L" invertido sobreposto a uma pequena abertura localizada no parapeito abaixo da janela, cuja finalidade é atuar como fonte complementar de circulação de ar fornecido pelas aberturas de entrada. São elementos interessantes, em detrimento aos elementos vazados, por exemplo, porque os planos vertical e horizontal do "L" protegem da chuva e permitem a passagem dos ventos, favorecendo a ventilação noturna.

As simulações foram feitas para quatro orientações de sala de aula (norte, sul, leste e oeste), de forma a testar diferentes orientações de implantação do edifício, uma vez que, na prática, há construções do Proinfância em diferentes orientações, inclusive com as aberturas da sala de aula orientadas para fachadas desfavoráveis, como a oeste, por exemplo.

Também foi analisada a presença ou ausência de dispositivos de sombreamento – venezianas horizontais de alumínio e colocadas na parte externa das janelas. Estes são compostos por 7 planos horizontais e 2 planos verticais em ambos os lados para fornecer sombreamento regular em todas as orientações.

Diferentes configurações e padrões de uso para a porta de acesso interno foram investigados: porta padrão fechada (PF), porta aberta (PA), porta baía (PB) e porta veneziana (PV). A meia-porta, popularmente conhecida como porta baía, é comumente adotada em algumas escolas infantis brasileiras devido à possibilidade de abrir a metade superior da porta para ventilar, enquanto a metade inferior da porta pode permanecer fechada para a segurança e controle das crianças (Figura 3).

A ferramenta de análise da dinâmica dos fluidos computacional do DesignBuilder foi usada para fornecer uma análise detalhada do movimento do ar dentro da sala de aula estudada. Essa abordagem tem sido usada para apoiar e enriquecer a discussão dos estudos de desempenho térmico (ELSHAFEI *et al.*, 2017; TALEB, 2015). As simulações utilizaram o método de volumes finitos para resolver o conjunto de equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, além de equações extras para fechamento de modelagem de turbulência para estado estacionário. O modelo de turbulência utilizado é o modelo k-ε padrão. O algoritmo SIMPLE foi usado para o acoplamento pressão-velocidade. O esquema de interpolação *upwind* foi aplicado para termos advectivos. O resíduo máximo para cada equação resolvida foi definido como  $10^{-5}$ .

As condições de contorno de velocidade e temperatura são estimadas – para um determinado instante – a partir da simulação do EnergyPlus. Vazões volumétricas para as aberturas são estimadas por meio do coeficiente de pressão calculado pelo EnergyPlus. A temperatura associada a cada abertura é estimada em função das temperaturas internas, também calculadas pelo módulo. Dessa forma, como recorte do trabalho, definiu-se às 12 h do dia 21 de dezembro (solstício de verão), a análise dos campos de velocidade e temperatura dentro da sala estudada, com orientação norte para a cidade de Vitória – em que a frequência e a velocidade do vento são mais significativas; e para orientação leste para a cidade de Belém.

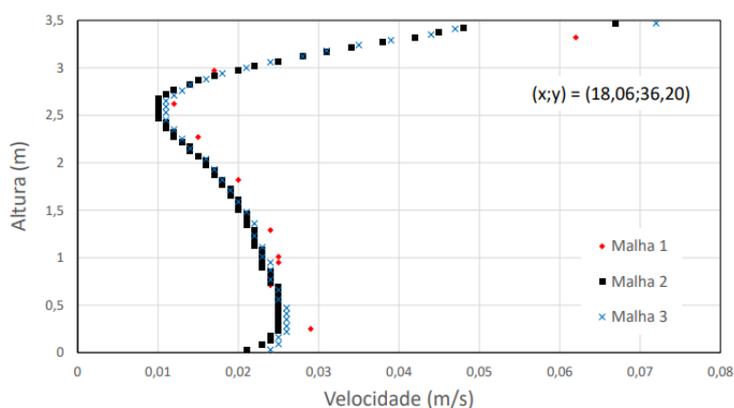
Um teste de sensibilidade de malha foi realizado para achar uma malha com resultados convergentes e com custo de processamento razoável. Três malhas com refinamentos distintos foram avaliadas. A malha 1, a mais grossa, é uniforme e tem espaçamento conforme a opção padrão do programa, ou seja, 0,3 m. Ela possui 16 x 23 x 9 volumes, respectivamente, nas direções x, y e z. A malha 2 também usa espaçamento uniforme, mas com o menor tamanho disponível no programa, isto é, 0,05 m, resultando numa resolução de 92 x 139 x 69 volumes. Finalmente, a malha 3 usa uma abordagem não uniforme, que tem um espaçamento geral de 0,1 m e refinamento em regiões próximas aos limites (paredes e aberturas), para as quais o tamanho do espaçamento é igual a 0,056 m. Isso lhe confere uma resolução de 54 x 90 x 44 volumes. A Figura 4 apresenta o perfil vertical para a magnitude do vetor velocidade em  $(x, y) = (18,06, 36,20)$ . As três malhas testadas são capazes de capturar a característica principal do fluxo nessa linha; entretanto, comparada à malha 2, que é a mais refinada possível, a malha 1 parece superestimar a velocidade, principalmente na região próxima à parede. As malhas 2 e 3, por sua vez, apresentam resultados muito próximos. Visto que a

malha 3 fornece resultados (cerca de 5 vezes) mais rápidos que a malha 2, a malha 3 foi escolhida como a malha de trabalho. Cada simulação usando a malha 3 levou aproximadamente 2 horas e meia em um PC equipado com um Intel® Core™ i5-4200 rodando a 2,3 GHz com 8 GB de memória.

Figura 3 - Modelos de aberturas estudados

Casos	Janela padrão (M1)	Janela com pivotante (M2)	Janela com peitoril ventilado (M3)
<b>Imagens</b>			
<b>Dados técnicos</b>	Largura da janela = 3,60 m Altura da janela = 1,60 m (0,40 m sistema fixo + 1,20 m sistema de correr) Peitoril da janela = 0,50 m Área da janela = 5,76 m <sup>2</sup> Área de ventilação natural = 1,98 m <sup>2</sup> Pé direito = 3,00 m Percentual da área de abertura em função da área de piso = 19,57 %	Largura da janela = 3,60 m Altura da janela = 1,60 m (0,40 m sistema fixo + 0,80 m sistema de correr + 0,40 m sistema pivotante) Peitoril da janela = 0,50 m Área da janela = 5,76 m <sup>2</sup> Área de ventilação natural = 2,48 m <sup>2</sup> Pé direito = 3,00 m Percentual da área de abertura em função da área de piso = 21,40 %	Largura da janela = 3,60 m Altura da janela = 1,20 m (1,20 m sistema de correr) Peitoril da janela = 0,50 m + 0,20 m peitoril ventilado Área da janela = 4,32 m <sup>2</sup> Área de ventilação natural = 2,70 m <sup>2</sup> Pé direito = 3,00 m Percentual da área de abertura em função da área de piso = 22,21 %
Casos	Janela com pivotante e peitoril ventilado (M4)	Elemento sombreador	Porta padrão fechada (PF)
<b>Imagens</b>			
<b>Dados técnicos</b>	Largura da janela = 3,60 m Altura da janela = 1,20 m (0,80 m sistema de correr + 0,40 m sistema pivotante) Peitoril da janela = 0,50 m + 0,20 m peitoril ventilado Área da janela = 4,32 m <sup>2</sup> Área de ventilação natural = 3,20 m <sup>2</sup> Pé direito = 3,00 m Percentual da área de abertura em função da área de piso = 24,04 %	Largura da janela = 3,60 m Altura do sombreador = Altura da janela Largura do sombreador = 0,25 m Ângulo = 30° Distância entre os planos = 0,25 m Distância da parede = 0,16 m	Largura da porta = 0,80 m Altura da porta = 2,10 m Área da porta = 1,68 m <sup>2</sup> Área de ventilação natural = 0% Pé direito = 3,00 m Percentual da área de abertura em função da área de piso = 0%
Casos	Porta padrão aberta (PA)	Porta tipo baía (PB)	Porta com veneziana (PV)
<b>Imagens</b>			
<b>Dados técnicos</b>	Largura da porta = 0,80 m Altura da porta = 2,10 m Área da porta = 1,68 m <sup>2</sup> Área de ventilação natural = 1,68 m <sup>2</sup> Pé direito = 3,00 m Percentual da área de abertura em função da área de piso = 6,15 %	Largura da porta = 0,80 m Altura da porta = 2,10 m (0,95 m veneziana + 1,15 m porta padrão) Área da porta = 1,68 m <sup>2</sup> Área de ventilação natural = 0,76 m <sup>2</sup> Pé direito = 3,00 m Percentual da área de abertura em função da área de piso = 2,78%	Largura da porta = 0,80 m Altura da porta = 2,10 m (1,05 m baía + 1,05 m porta padrão) Área da porta = 1,68 m <sup>2</sup> Área de ventilação natural = 0,84 m <sup>2</sup> Pé direito = 3,00 m Percentual da área de abertura em função da área de piso = 3,07%

Figura 4 - Perfil vertical da magnitude do vetor velocidade em (x; y) = (18,06; 36,20) para as três malhas testadas



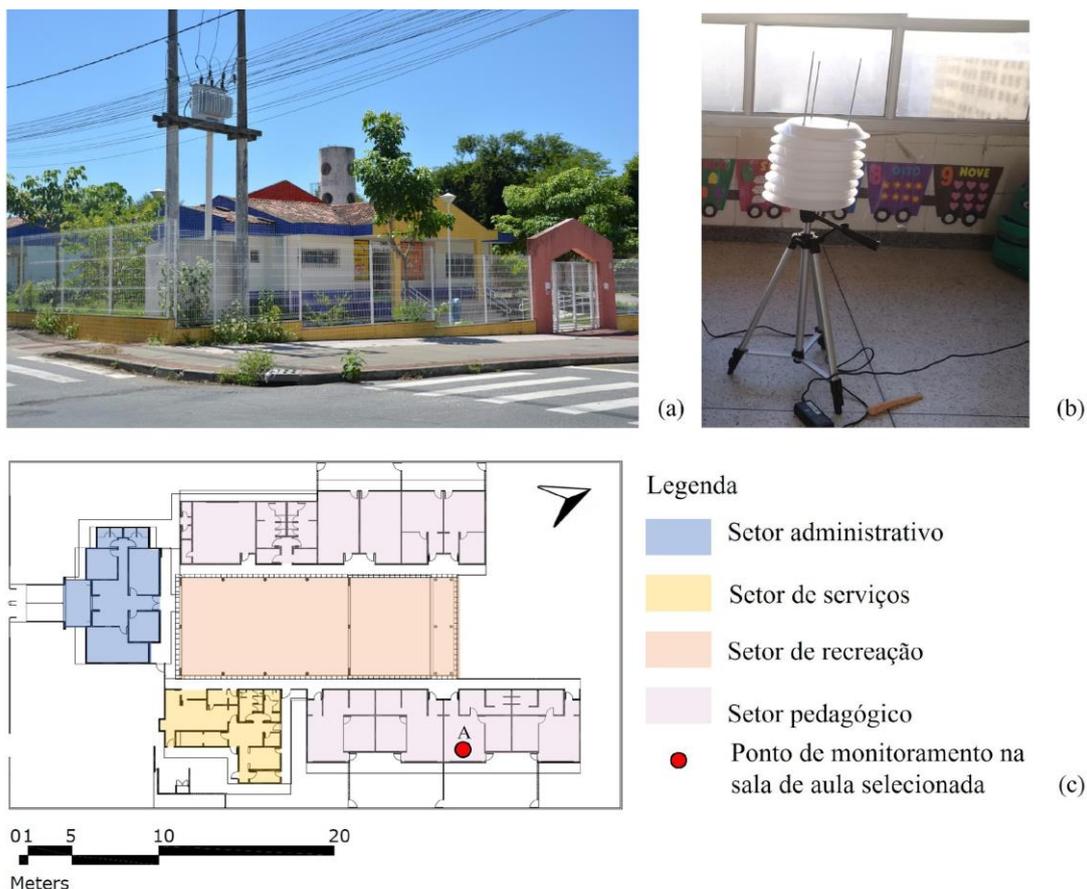
## Experimento de campo e calibração do modelo

Com a finalidade de calibração e validação do modelo simulado foi realizado um experimento de campo, com registro dos dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar, em uma sala de aula semelhante à configuração do ambiente estudado, pertencente a uma escola do padrão Proinfância localizada na cidade de Serra, na Região Metropolitana de Vitória (Figura 5). A escolha dessas duas variáveis foi feita por serem suficientes para calibração de modelos de desempenho térmico, como realizado por Saleh (2015).

O prédio foi inaugurado em 2016 e atende 321 crianças de dois a cinco anos. Embora se trata de crianças de pouca idade, o edifício foi selecionado por representar 60% das unidades concluídas no país do Programa Proinfância (MINISTÉRIO..., 2021), sendo, portanto, fundamental o estudo do seu desempenho térmico. O projeto arquitetônico tem uma área coberta de 1.323,53 m<sup>2</sup> e é composto por espaços para administração, serviços, recreação e atividades educacionais. A sala selecionada tem orientação sudeste (110°), área de 27,29 m<sup>2</sup>, volume de 81,87 m<sup>3</sup> e capacidade para 12 alunos e dois professores.

As medições de campo foram realizadas de segunda a sexta-feira, entre os dias 4 e 8 de novembro de 2019, na primavera. Os dados de temperatura e umidade do ar foram medidos de minuto a minuto, diariamente, por meio do equipamento HOBO, modelo U12-013, durante 5 horas por dia, das 9h00 às 11h00 e das 13h00 às 16h00. Os valores armazenados foram transferidos para um computador usando o programa HOBOWare (Software for HOBO U-Series Data Loggers & Devices) versão 2.7 para Windows. O equipamento foi posicionado a aproximadamente 0,60 m do chão, o que corresponde à altura da mesa de uma sala de aula infantil, e devidamente protegido seguindo as recomendações da ISO 7726 (INTERNATIONAL..., 1998).

Figura 5 - Local do experimento de campo: (a) escola padrão Proinfância selecionada, (b) equipamento instalado no local para registro dos dados de temperatura e umidade relativa do ar e (c) ponto de monitoramento na sala de aula estudada



A calibração visa obter um modelo que possa reproduzir o objeto de estudo da forma mais confiável, reduzindo assim a possibilidade de dados de saída inconsistentes com a realidade. Essa estratégia tem sido amplamente aplicada em artigos científicos que abordam simulações computacionais (PISELLO; BOBKER; COTANA, 2012; RAFTERY; KEANE; O'DONNELL, 2011; TULSYAN *et al.*, 2013). Para calcular o índice de incerteza entre os valores registrados e simulados neste trabalho, a simulação computacional da sala de aula selecionada foi realizada nas mesmas condições do experimento de campo – orientação, horários e ventilação natural. Para a comparação dos resultados, foram considerados os últimos três dos cinco dias de monitoramento de campo (6 a 8 de novembro de 2019), visto que, conforme noticiado no noticiário local, 4 e 5 de novembro de 2019 foram dias atípicos, registrando-se as maiores temperaturas desse ano (BENÍCIO, 2019). Posteriormente, foram adotados os métodos matemáticos *Normalized Mean Bias Error* (NMBE) e coeficiente de variação do *Root-Mean Square Error* (CVRMSE), que se encontram entre os mais utilizados para avaliar o grau de incerteza dos resultados (SALEH, 2015). O NMBE é usado para normalizar o índice do erro de polarização média (MBE), representando a média dos erros existentes em uma amostra de dados. O NMBE dimensiona os dados gerados pelo MBE, tornando-os comparáveis. O CVRMSE é responsável por medir a variação dos erros obtidos na comparação de dados medidos e simulados (RUIZ; BANDERA, 2017). Os índices NMBE e CVRMSE são obtidos por meio de equações matemáticas que relacionam os dados simulados e os dados registrados *in loco*, dados, respectivamente, pelas Equações 1 e 2.

$$NMBE = \frac{1}{m} \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n-p} 100(\%) \quad \text{Eq. 1}$$

$$CV(RMSE) = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n-p}} 100(\%) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$m$  é dado pela média dos valores medidos;

$p$  representa a quantidade de parâmetros ajustáveis do modelo (para fins de calibração  $p = 0$ );

$m_i$  corresponde aos valores medidos *in loco*;

$s_i$  corresponde aos valores simulados; e

$n$  é a quantidade de dados a serem comparados.

Segundo Haberl, Culp e Claridge (2005), para a verificação adequada do modelo, recomenda-se que o NMBE e o CVRMSE sejam testados e observados em conjunto para evitar que erros que possam estar presentes no NMBE, como erros de cancelamento, sejam esquecidos. Para que o modelo seja considerado calibrado, os resultados obtidos pelas Equações 1 e 2 devem estar na faixa de incerteza descrita na Tabela 2.

O estudo em questão utilizou três métodos para o cálculo dos índices de incerteza associados aos resultados da temperatura do ar:

- cálculo dos valores de toda a temperatura registrada por 15 horas;
- subdivisão dos dados em dias (5 horas registradas em cada dia); e
- cálculo das médias entre os índices obtidos em cada um dos dias monitorados (3 dias).

Esse procedimento, também seguido por Saleh (2015), foi realizado com o objetivo de proporcionar uma análise diversificada dos valores obtidos para o NMBE, bem como, para o CVRMSE. A Tabela 3 mostra os resultados dos índices de incerteza calculados, relacionando os resultados do monitoramento de campo e da simulação numérica. Ressalta-se que os resultados se encontram dentro da faixa recomendada por Haberl, Culp e Claridge (2005), tanto para o NMBE quanto para o CVRMSE, considerando os três métodos de cálculo adotados. Assim, o modelo pode ser considerado adequado.

Tabela 2 - Faixa de incerteza associada com o NMBE e CVRMSE

VARIÁVEIS	MÉTODO	FAIXA DE INCERTEZA ASHRAE 14:2002
Médias mensais	NMBE	± 5
	CVRMSE	0 to 15
Médias horárias	NMBE	± 10
	CVRMSE	0 to 30

Fonte: adaptado de Haberl, Culp e Claridge (2005).

Tabela 3 - Índice de incerteza calculado para o NMBE e CVRMSE

	MÉTODO	NMBE	CVRMSE	SITUAÇÃO
Método 1	Quarta-feira (06/11)	-4,6	4,95	Atendido
	Quinta-feira (07/11)	-4,54	5,16	Atendido
	Sexta-feira (08/11)	0,95	2,8	Atendido
Método 2	Considerando toda a amostra	-2,7	4,41	Atendido
Método 3	Média entre os índices de cada dia	-2,73	4,3	Atendido

## Parâmetros de desempenho térmico adotados

O propósito principal deste trabalho foi analisar e identificar as melhores opções de aberturas, e associações entre elas, de forma a subsidiar futuros projetos de edifícios escolares, localizados em uma zona tropical quente, visando o bom desempenho térmico. Para isso, a avaliação das condições térmicas internas baseou-se na proposta de Teli *et al.* (2017), que corrigiu o modelo de conforto adaptativo tradicional da EN 15251 para avaliação de conforto térmico em espaços infantis. Autores em todo o mundo enfatizam que as diferenças físicas e fisiológicas entre as crianças e os adultos produzem diferentes respostas térmicas (YUN *et al.*, 2014), sendo que a temperatura de conforto das crianças se mostra aproximadamente de 2 °C a 4 °C mais baixa do que os modelos adaptativos padrões (DE DEAR *et al.*, 2015; HWANG *et al.*, 2009; JIANG *et al.*, 2020).

Os modelos de conforto térmico adaptativos oferecem uma nova abordagem para edifícios com ventilação natural, definindo que as flutuações de temperatura podem ser vistas como aceitáveis pelos seus ocupantes. Por esse motivo, essa metodologia é considerada a mais adequada para climas quentes (ATTIA; CARLUCCI, 2015), incluindo o Brasil (ANDREASI; LAMBERTS; CÂNDIDO, 2010).

Utilizou-se, portanto, os limites de conforto baseados no modelo adaptativo infantil desenvolvido por Teli *et al.* (2017) e descrito na Equação 3, com base na norma europeia EN 15251 (EUROPEAN..., 2007), uma vez que a aplicação dos modelos atuais para adultos não seria adequada para avaliações de desempenho térmico de espaços infantis.

$$T_{comf\_child} = 0,26T_{rm} + 18,2 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde  $T_{rm}$  é a média ponderada exponencial da temperatura do ar de bulbo seco externo diário, obtida pela Equação 4.

$$T_{rm} = (1 - \alpha) \sum_{i=0}^n \alpha^i T_{ed/-(1+i)} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que  $T_{ed/-(1+i)}$  é a temperatura média diária do ar de bulbo seco externo do dia anterior (1 + i) e  $\alpha$  é uma constante que varia no intervalo [0 e 1], sendo utilizado o valor de  $\alpha = 0,8$  como recomendado nos trabalhos de Attia e Carlucci (2015) e Teli, James e Jentsch (2015). A partir de algumas manipulações algébricas, demonstradas a seguir (Equação 5), é possível simplificar a Equação 4, com o objetivo de obter de forma recorrente o  $T_{rm}$  de cada dia em função do  $T_{rm}$  do dia anterior:

$$\begin{aligned} T_{rm} &= (1 - \alpha) \sum_{i=0}^n \alpha^i T_{ed/-(1+i)} \\ T_{rm} &= (1 - \alpha) [T_{ed/(-1)} + \alpha T_{ed/(-2)} + \alpha^2 T_{ed/(-3)} + \alpha^3 T_{ed/(-4)} + \dots] \\ T_{rm} &= (1 - \alpha) T_{ed/(-1)} + (1 - \alpha) [\alpha T_{ed/(-2)} + \alpha^2 T_{ed/(-3)} + \alpha^3 T_{ed/(-4)} + \dots] \\ T_{rm} &= (1 - \alpha) T_{ed/(-1)} + \alpha (1 - \alpha) [T_{ed/(-2)} + \alpha T_{ed/(-3)} + \alpha^2 T_{ed/(-4)} + \dots] \\ T_{rm} &= (1 - \alpha) T_{ed/(-1)} + \alpha T_{rm-1} \end{aligned} \quad \text{Eq. 5}$$

Assim, a Equação 5 foi adotada para o cálculo da  $T_{rm}$  diária. Para calcular a  $T_{rm}$  de forma recorrente, se faz necessário obter a  $T_{rm}$  do primeiro dia a ser analisado, visto que as demais foram obtidas a partir dele. Para isso a norma EN 15251 (EUROPEAN..., 2007) recomenda que o  $T_{rm}$  do primeiro dia seja obtido por meio da Equação 6, ou seja, levando em consideração as médias diárias do ar externo dos últimos 7 dias, visto que os dados referentes aos dias mais distantes do dia em questão oferecem menor influência no resultado da média ponderada. Assim, a média ponderada exponencial da temperatura do ar de bulbo seco externo diário do primeiro dia da amostra analisada ( $T_{rm0}$ ), foi obtida pela Equação 6.

$$T_{rm0} = \frac{T_{ed/(-1)} + 0,8T_{ed/(-2)} + 0,6T_{ed/(-3)} + 0,5T_{ed/(-4)} + 0,4T_{ed/(-5)} + 0,3T_{ed/(-6)} + 0,2T_{ed/(-7)}}{3,8} \quad \text{Eq. 6}$$

De posse do  $T_{rm0}$  do primeiro dia, o  $T_{rm}$  dos demais dias foram calculados, e em seguida, a temperatura de conforto  $T_{comf\_child}$  foi calculada por meio da Equação 3.

A EN 15251 define que os limites de aceitabilidade são expressos para diferentes categorias de edifícios e de ocupantes em intervalos simétricos, em torno da temperatura de conforto, sendo a situação adotada por essa pesquisa a categoria I – que contempla espaços ocupados por pessoas muito sensíveis e frágeis, tais como portadores de necessidades especiais, enfermos, idosos e crianças (EUROPEAN..., 2007). Assim, para obter os limites superiores e inferiores da temperatura de conforto basta somar e subtrair 2 °C, respectivamente, à temperatura de conforto infantil ( $T_{comf\_child}$ ), obtida na Equação 3. Dessa forma, para estudar o desconforto por calor, deve-se encontrar o limite superior do intervalo da temperatura de conforto diária ( $T_{m\acute{a}x}$ ), obtida pela Equação 7.

$$T_{m\acute{a}x} = T_{comf\_child} + 2 = 0,26 T_{rm} + 18,2 + 2 \quad \text{Eq. 7}$$

A partir de então, a avaliação do desempenho térmico dos ambientes simulados para cada hora do dia ao longo do ano seguiu a abordagem estatística proposta por Sicurella, Evola e Wurtz (2012). Esse método de análise relaciona dois indicadores: frequência do desconforto térmico (FDT) e intensidade do desconforto térmico (IDT). O FDT corresponde ao percentual de tempo em que a temperatura operativa ficou acima da temperatura de conforto – 24 horas corresponde a 100% e a cada hora a 4,16%. O IDT é registrado quando a temperatura operativa horária excede a temperatura de conforto de referência, gerando um acúmulo de temperatura de desconforto a cada hora adicionada até o final do dia, representando o IDT diário (°C.h/dia).

O valor máximo de referência utilizado para o IDT em Vitória foi o maior valor encontrado entre as situações simuladas: FTD = 100% (ou 24 horas) e IDT horas = 115,98 °C.h/dia (verão, 3 de fevereiro, janela padrão - W1, orientação oeste, porta padrão fechada - D1). Em Belém, o maior valor encontrado também foi registrado sob as mesmas configurações das aberturas para o verão.

Foi calculada a quantidade de horas, considerando horas inteiras, ao longo do dia, em que haveria desconforto térmico por calor, assim como foi calculado também o total de horas desconfortáveis acumulado ao longo do ano em todos os casos simulados, tanto em Vitória quanto em Belém.

O consumo energético foi calculado a partir da FDT anual, obtido em horas, em cada cidade, para proporcionar o condicionamento artificial do ar da sala de aula por todo o período em que a média horária da temperatura operativa interna estaria acima da temperatura máxima de conforto, ou seja, que ocorre desconforto por calor, considerando o limite de aceitabilidade. Quando os valores de temperatura, portanto, ultrapassam esse limite, foi considerada a situação de climatização artificial apenas para cálculo do consumo de energia aproximado, circunstância a partir da qual as aberturas deveriam ser então fechadas.

Para atender a área da sala de aula (27,29 m<sup>2</sup>), foram selecionados dois aparelhos condicionadores de ar frio da marca Consul, modelo CCY12B, do tipo janela, cuja capacidade é de 12.000 BTUs e a potência é de 1.166 W, cada um. Os equipamentos são devidamente classificados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), com o selo Procel de economia de energia classe “A” (PROCELINFO, 2021). Segundo o fabricante, cada aparelho tem um consumo energético aproximado de 1,166 kWh (CONSUL, 2021), então o consumo necessário para atender a sala de aula é de 2,332 kWh.

## Resultados e discussões

Os resultados de desempenho térmico da sala de aula estudada, sob diferentes configurações de aberturas, foram divididos em três seções:

- (a) análises obtidas para a cidade de Vitória;
- (b) análises obtidas para Belém; e
- (c) o consumo energético do ambiente, calculado para cada cidade, levando em consideração a necessidade de climatização artificial nos períodos em que a média horária da temperatura operativa interna estaria acima da temperatura máxima de conforto.

### Vitória

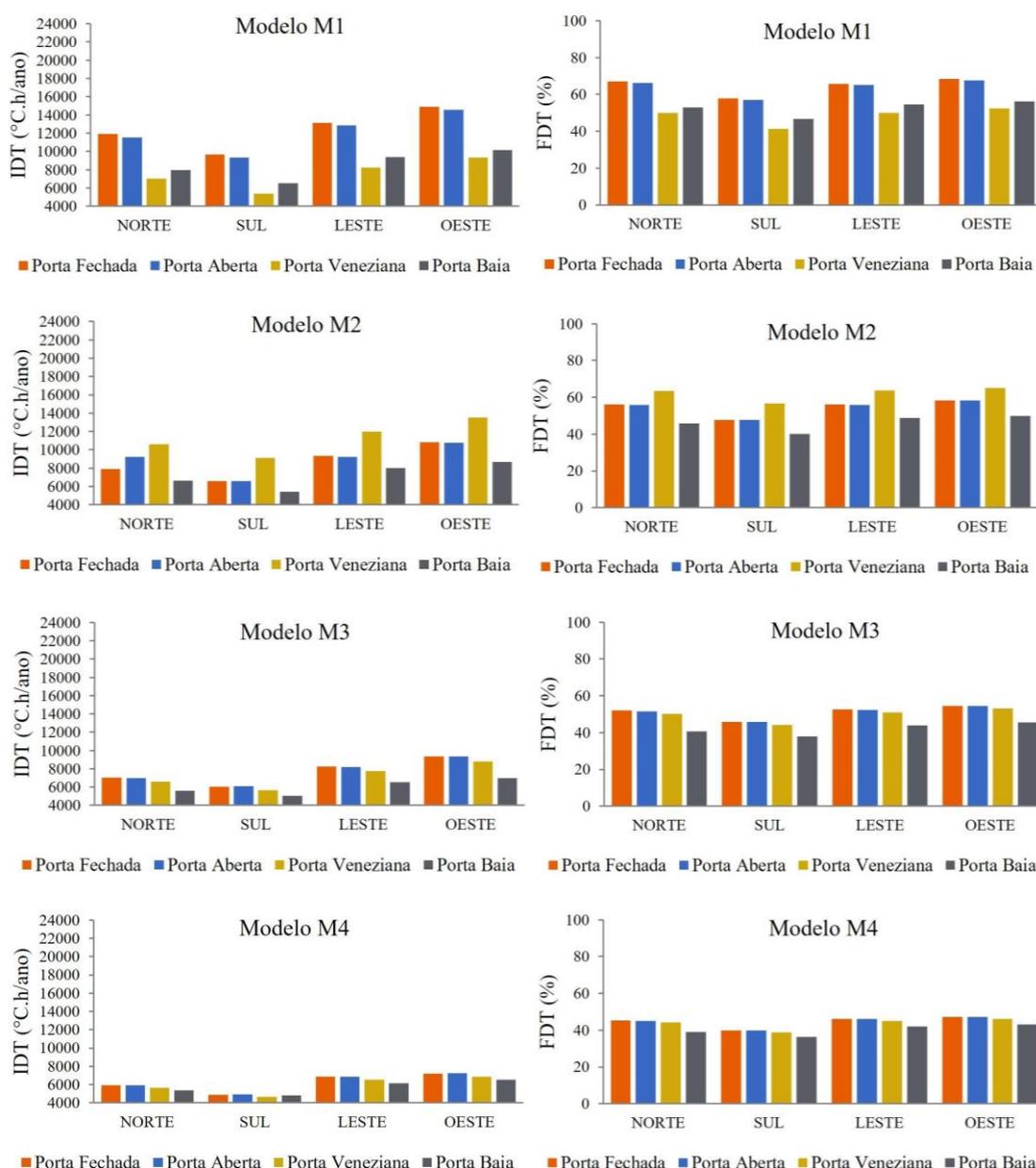
Na Figura 6 observa-se que, mesmo analisando os resultados sob diferentes configurações de portas, a janela M1 tem o pior desempenho térmico em relação aos demais modelos de janelas. A intensidade de desconforto térmico máxima alcançada pela configuração da janela padrão (M1) com a porta fechada (PF) foi de 14.898 °C.h/ano, 13.149,1 °C.h/ano, 11.909,3 °C.h/ano e 9.659,9 °C.h/ano, para a sala de aula orientada a oeste, leste, norte e sul, respectivamente. É possível reforçar que a orientação da abertura da sala à oeste na cidade

de Vitória – em que a insolação acontece no período vespertino, com as alturas solares e azimutes determinando ângulos menores de incidência no plano vertical da fachada, e por sua vez implicando em uma absorção mais intensa do calor; é a orientação que resulta em pior desempenho térmico para o ambiente, como constatado também no estudo de Nico-Rodrigues *et al.* (2015) para a mesma localidade.

Ao simular a janela M1 com a porta totalmente aberta (PA), ao contrário do que comumente se pensa, a frequência de desconforto térmico não reduz significativamente em relação à simulação com a porta fechada, alcançando uma FDT de 57,1% das horas do ano quando a implantação é para o sul e de 67,5% quando a implantação é oeste.

Para esse modelo de janela (M1), na região de Vitória, a melhor opção de desempenho térmico é registrada com o uso da porta veneziana, em todas as orientações analisadas, apresentando um IDT de 9.322,4 °C.h/ano, 8.228,4 °C.h/ano, 7.031 °C.h/ano, 5.387,6 °C.h/ano, para a sala de aula orientada a oeste, leste, norte e sul, respectivamente.

Figura 6 - IDT e FDT anual para Vitória, considerado cada configuração de janela e porta



Tal fato se dá pelo incremento da velocidade do vento ao se ter alturas diferentes de entrada (janela padrão) e saída (porta com veneziana) do ar, o que não acontece quando a porta está totalmente aberta. Favarolo e Manz (2005), em sua investigação por meio da dinâmica dos fluidos computacional sobre ventilação natural através de aberturas retangulares, constatou que embora o aumento da área de ventilação tenha impacto positivo na redução das temperaturas internas de um ambiente, a posição vertical das aberturas é um dos parâmetros de maior impacto na velocidade do ar.

Dessa forma, o desempenho térmico da sala de aula melhora à medida que se aumenta a área de ventilação da janela ( $M4 > M3 > M2 > M1$ ). Entretanto, a configuração da porta impacta nos resultados entre os modelos de janelas. A associação de aberturas com o melhor desempenho térmico em Vitória foi com o uso da janela M4 (janela padrão com pivotantes e peitoril ventilado) e a porta baía (PB). Ou seja, essa associação representa não somente o impacto do aumento da área de abertura da janela, mas a configuração estratégica do peitoril ventilado, representando também uma entrada de ar mais baixa em relação à saída (porta baía).

Esses resultados corroboram com Bittencourt *et al.* (2008), cujo trabalho investigou a adoção positiva do peitoril ventilado em ambientes escolares em Maceió como forma de melhorar a distribuição do fluxo de ar em edifícios localizados em climas quentes e úmidos.

O IDT da associação da M4 com a PB é de 6.517,6 °C.h/ano, 6.159,4 °C.h/ano, 4.818,9 °C.h/ano, 5.350,8 °C.h/ano, para a sala de aula orientada a oeste, leste, norte e sul, respectivamente. Observa-se que esses resultados são de 40% a 55% menores em comparação aos resultados obtidos pela configuração utilizada pelo projeto do Proinfância, janela padrão com porta aberta ou fechada. De fato, tem-se que é importante repensar as tipologias das aberturas e a associação entre elas, nas edificações escolares, em busca de um ambiente com boas condições para proporcionar conforto térmico.

Pode-se inferir que a orientação da sala de aula, em Vitória, tanto para o sul quanto para o norte, quando associada às configurações de abertura que priorizam a ventilação natural, impacta positivamente no desempenho térmico do ambiente, uma vez que a região apresenta predominância em frequência e velocidade do vento norte (20,7% e 7 m/s, respectivamente) e vento nordeste (33,1% e 6 m/s, respectivamente) no verão, favorecendo a redução das temperaturas.

As Figuras 7 e 8 mostram o comportamento da ventilação natural através das aberturas estudadas. É possível constatar que a adição das pivotantes na janela padrão (M2 e M4) aumenta o fluxo de ar no topo da sala próxima ao teto, enquanto a adição do peitoril ventilado (M3 e M4) permite maior velocidade do vento na entrada do dispositivo, e consequentemente na altura do usuário (1 m para crianças) – corroborando com os resultados de Bittencourt *et al.* (2008).

Reforça-se, com esse recurso de visualização, que a porta aberta (PA) aumenta levemente a velocidade do ar na entrada da abertura da janela, mas esse aumento não é significativo, tornando o padrão de fluxo e distribuição do ar dentro da sala nesta configuração muito semelhante ao movimento do ar quando a porta está fechada (PF). Por outro lado, o efeito da redução do tamanho da saída de ar, representado pela porta veneziana (PV) e a porta baía (PB) estudadas, amplifica consideravelmente a velocidade de entrada e saída do ar pelas aberturas, aumentando assim a distribuição e velocidade do vento dentro da sala de aula e, consequentemente, diminuindo a temperatura do ambiente.

A Figura 9 mostra a simulação da circulação do vento, nos planos horizontal e vertical, dentro da sala de aula orientada para o norte, para o solstício de verão, com a associação do modelo de janela padrão e peitoril ventilado (M3) com a porta baía (PB); janela com adição de pivotantes e peitoril ventilado (M4) e com porta baía; e com o modelo de janela padrão com pivotantes (M2) com a porta veneziana (PV).

Observa-se que ao se utilizar uma abertura de entrada de ar mais baixa – representada pelo modelo M3 ou M4, associada a uma saída de ar mais alta do que sua entrada – representada pela porta baía, tem-se um aumento das velocidades do ar tanto na entrada quanto na saída. Esse resultado mostra que um adequado dimensionamento e posicionamento das aberturas pode aumentar a distribuição do ar no ambiente, principalmente no plano de trabalho (altura da mesa da sala de aula). Por outro lado, a adição apenas de aberturas superiores a janela padrão – representadas pelas pivotantes, apresentam pior desempenho quando associadas a saídas de ar mais baixas do que a entrada, representadas pela porta veneziana. Observa-se que as janelas pivotantes aumentam o fluxo de ar em direção ao teto e a saída de ar pela PV influencia levemente o fluxo de ar próximo ao chão, na região próxima à porta, deixando a região central da sala com velocidades significativamente menores e impactando na distribuição do vento.

Figura 7 - Vetores de velocidade do vento e campo de temperaturas na sala de aula orientada a norte, em Vitória, no dia 21 de dezembro às 12h00, considerando as diferentes configurações de janelas com a porta fechada (PF)

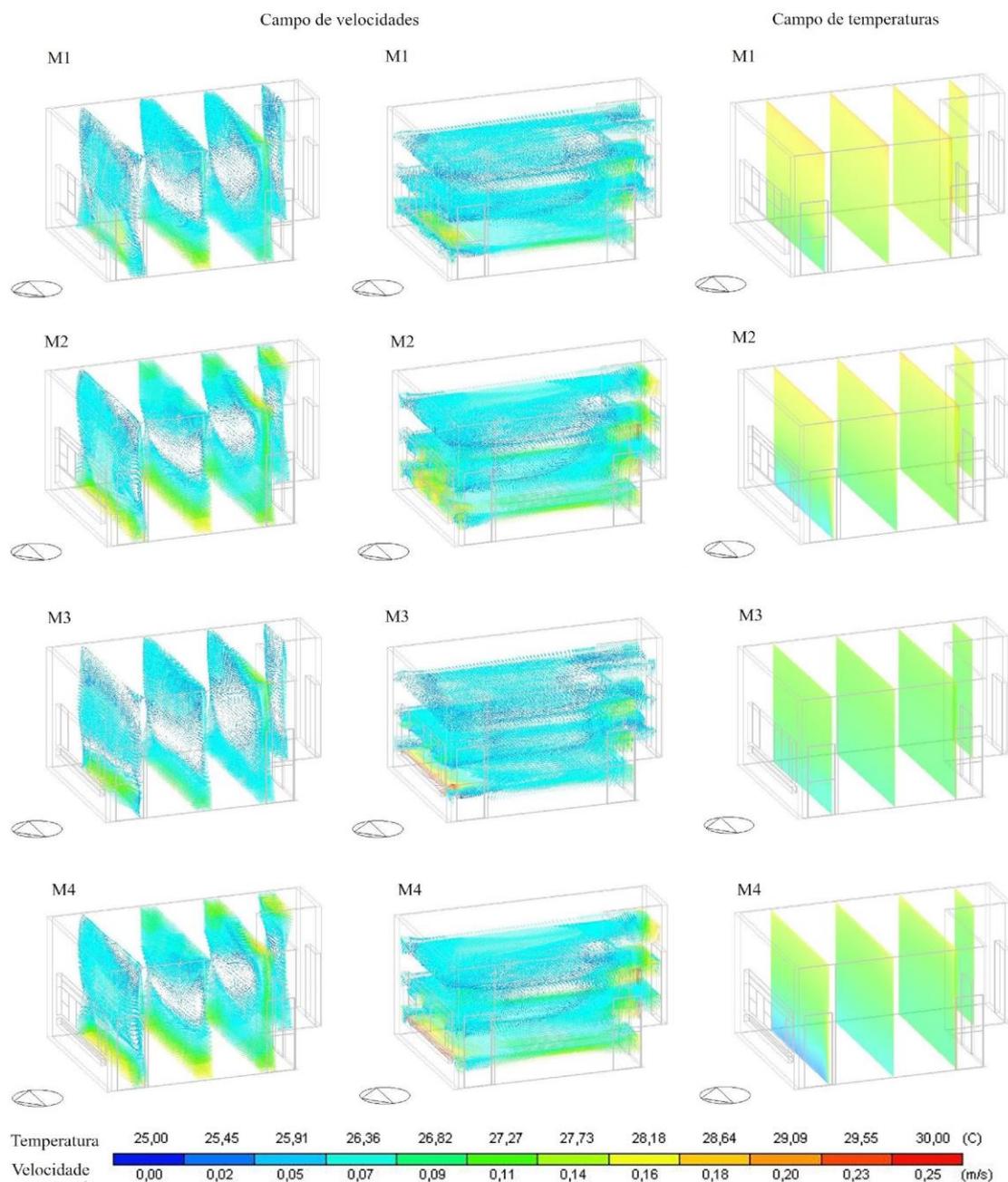


Figura 8 - Vetores de velocidade do vento e campo de temperaturas na sala de aula orientada a norte, em Vitória, no dia 21 de dezembro às 12h00, considerando a janela padrão (M1) com as diferentes configurações de porta

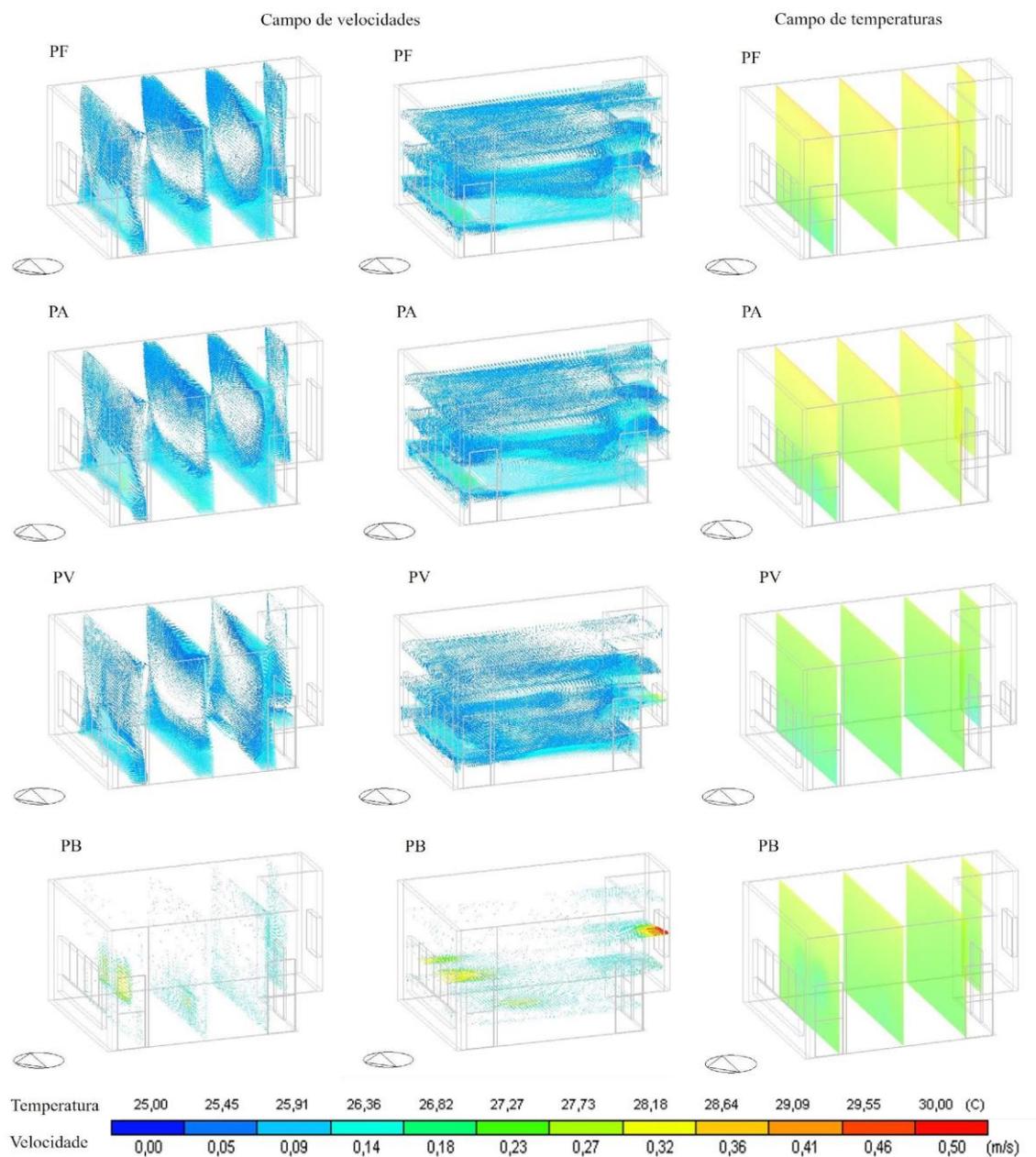
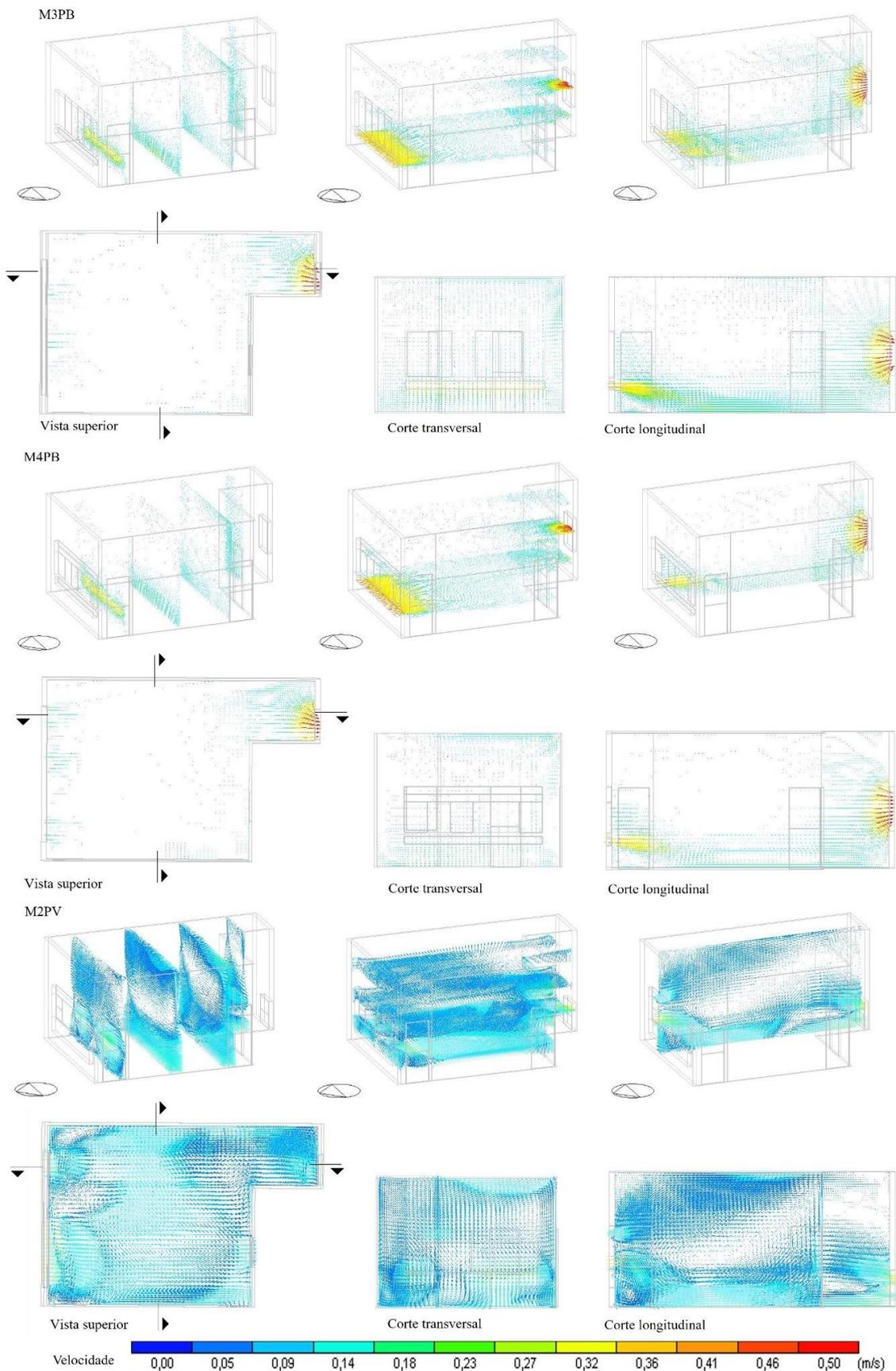


Figura 9 - Vetores de velocidade do vento, na sala de aula orientada para o norte, em 21 de dezembro, às 12h00 - ssociação da janela M3 com PB, janela M4 com PB; e janela M2 com PV

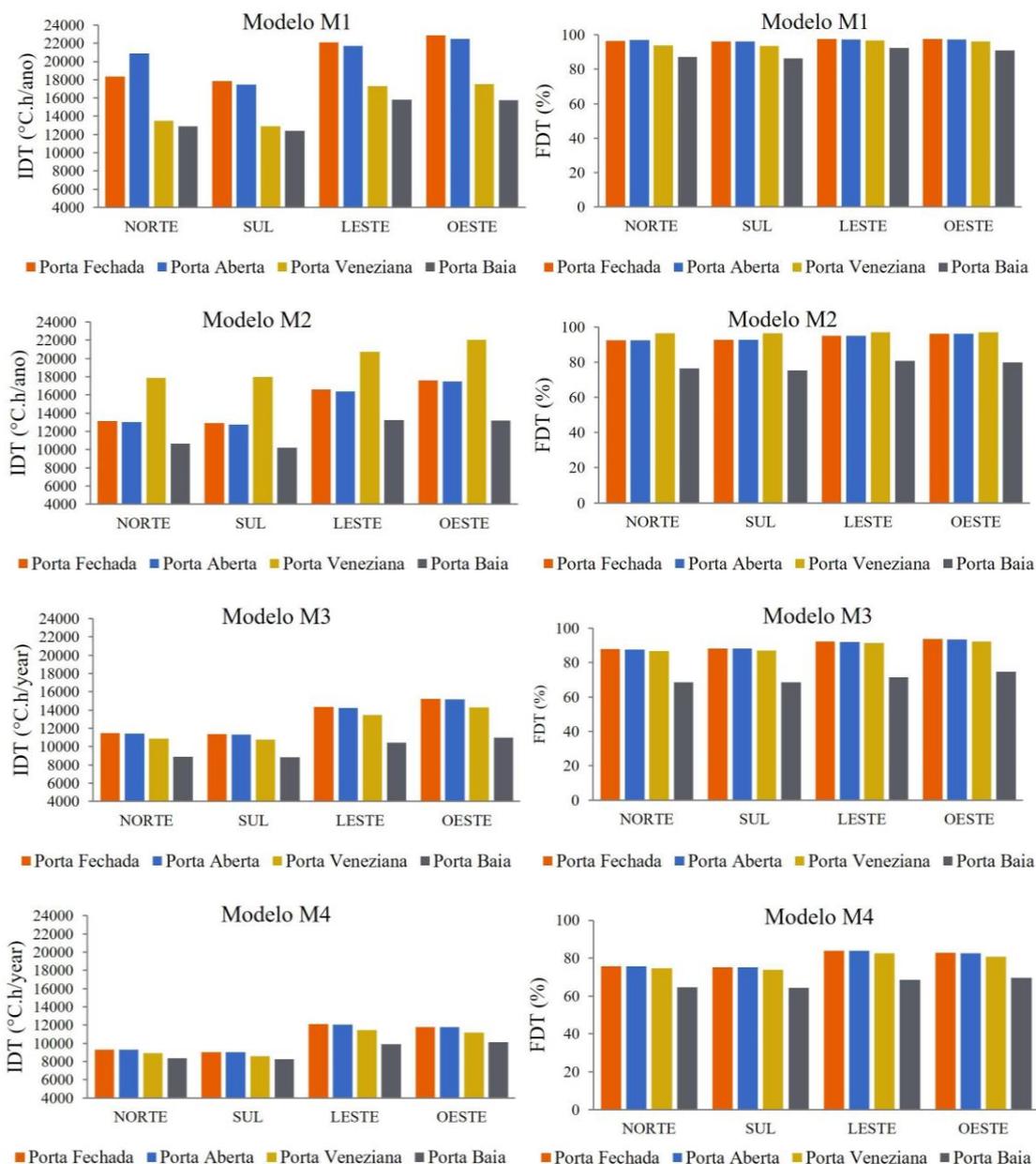


## Belém

Analisando os resultados para a região de Belém (Figura 10), observa-se que o desconforto térmico nessa cidade é bem maior do que o encontrado para Vitória. Tal fato pode ser atribuído pela proximidade com a Linha do Equador e pela menor intensidade dos ventos na região. Nessa cidade a janela padrão M1 continua apresentando o pior desempenho em relação aos demais modelos de janelas, com uma frequência de desconforto térmico (FDT) acima de 87,2% ao longo do ano. O IDT máximo alcançado é bem superior ao encontrado em Vitória, sendo para a configuração da janela padrão (M1) com a porta fechada (PF) de 22.877,2 °C.h/ano, 22.081,71 °C.h/ano, 17.835,9 °C.h/ano e 18.356,4 °C.h/ano, para a sala de aula orientada a oeste, leste, norte e sul, respectivamente.

Tais resultados caracterizam uma frequência de desconforto térmico em no mínimo 96% do ano e mostram a inadequação da associação entre a tipologia de janela e a porta padrão do edifício estudado, também, e até mais intensa, para a cidade de Belém.

Figura 10 - IDT e FDT anual para Belém, considerado cada configuração de janela e porta



A associação de aberturas com melhor desempenho térmico encontrado foi entre a janela M4 com a porta PB, registrando o IDT de 10.132,7 °C.h/ano, 9.905,7 °C.h/ano, 8.381,7 °C.h/ano e 8.269,9 °C.h/ano, para a sala de aula orientada a oeste, leste, norte e sul, respectivamente. Observa-se que a estratégia de se ampliar a área de ventilação da janela, bem como a inserção do peitoril ventilado, contribuiu para uma queda de mais de 50% no índice de desconforto térmico no ambiente. Entretanto, ainda se nota uma significativa frequência de desconforto térmico anual (FDT acima de 64,4%) em todas as configurações estudadas.

Pode-se inferir que, como a velocidade e frequência de ventos na região de Belém é menor do que na região de Vitória, utilizar apenas essa estratégia não é suficiente para um adequado desempenho térmico nesse ambiente, sendo necessário também associar aos outros métodos de desenho passivo, tal como o uso de sombreamento nas aberturas.

Tais resultados corroboram com Cardenal (2017), cujo estudo mostra que a utilização de diretrizes bioclimáticas no projeto de edifícios em Belém chega a melhorar e diminuir as temperaturas internas, possibilitando um desempenho térmico positivo, porém não suficiente para posicionar as zonas térmicas dentro do nível de conforto desejado em períodos de tempo homogêneos e constantes.

As Figuras 11 e 12 mostram a simulação da dinâmica dos fluidos computacional da circulação do vento – nos planos horizontal e vertical, e do campo de temperaturas – no plano vertical, dentro da sala de aula orientada para o leste, às 12h00, para o solstício de verão. É possível notar um leve aumento na velocidade do ar na entrada da abertura entre os modelos de janelas estudados – variando de M1 a M4, e reduzindo as temperaturas do ar do ambiente, porém permanecendo em média acima dos 28 °C durante o período apresentado. Da mesma forma, nota-se uma redução das temperaturas internas com a adoção das saídas de ar representadas pela porta baía e principalmente, pela porta veneziana, entretanto a média de temperaturas ainda fica cerca de no mínimo 1 °C a mais quando comparada às mesmas configurações em Vitória.

## Utilização de climatização artificial

A Figura 13 mostra o consumo de energia (kWh/m<sup>2</sup>) considerando o uso de sistemas de ar condicionado em relação à soma do IDT anual, para cada configuração de abertura estudada, com e sem a presença de sombreadores, para Vitória e Belém.

Em geral, em Vitória, com o uso de dispositivos de sombreamento, como *brise-soleil*, a demanda de energia com climatização diminui em relação à orientação de acordo com a seguinte ordem: oeste, leste, norte e sul. Assim como os resultados encontrados sem esse dispositivo, o maior consumo de energia é para a janela padrão (M1) e o menor para a janela M4. Entretanto, observa-se que existem orientações e configurações de aberturas em que o impacto do uso do sombreador na redução da carga térmica é mais significativo, indicando que há situações em que seu uso é mais promissor.

A configuração de abertura com pior desempenho – sala de aula orientada a oeste, janela padrão (M1) com a porta fechada (PF); atinge o maior valor de 510,9 kWh/m<sup>2</sup> e 485,0 kWh/m<sup>2</sup> sem e com o uso do dispositivo de sombreamento, respectivamente, o que mostra uma redução de 5% no consumo energético com apenas o uso deste dispositivo.

A sala de aula orientada para o norte em Vitória tem o maior impacto na redução do consumo de energia considerando todas as associações avaliadas, variando de 7% para a janela com adição de peitoril ventilado (M3) com a porta baía (PB), a 11% para a janela com adição pivotantes (M2) e a porta aberta (PA). Exceção apenas da configuração da janela padrão (M1) com porta veneziana (PV) que teve uma redução de 1% no consumo energético da sala nessa orientação. Por outro lado, quando a sala de aula é orientada para o sul, observa-se que o impacto desse dispositivo é menos expressivo em relação ao montante das configurações estudadas, variando de uma redução de 1% a 2% para todas as associações de aberturas, exceto para a janela padrão (M1) com porta veneziana (PV), que apresentam redução no consumo energético de aproximadamente 13% nessa orientação. Tem-se que a eficiência do uso do dispositivo de sombreamento é estritamente associada à orientação de implantação do ambiente.

Esse resultado é compreensível uma vez que, para a região de Vitória, a fachada norte é a que apresenta o maior número de horas de incidência solar ao longo do ano. Isso faz com que a intensidade do desconforto causado pelo calor nessa orientação seja significativamente reduzida pelo uso do dispositivo de sombreamento. Nessa cidade, as fachadas orientadas para o sul apresentam o menor número de horas de incidência solar ao longo do ano, apenas em dezembro, janeiro e parcialmente fevereiro. Consequentemente, o uso de dispositivos de sombreamento nessa região é efetivo apenas nesse período do ano.

Figura 11 - Campos de velocidade e temperatura do ar na sala de aula orientada a leste, em Belém, no dia 21 de dezembro as 12h00, considerando as diferentes configurações de janelas com a porta fechada (PF)

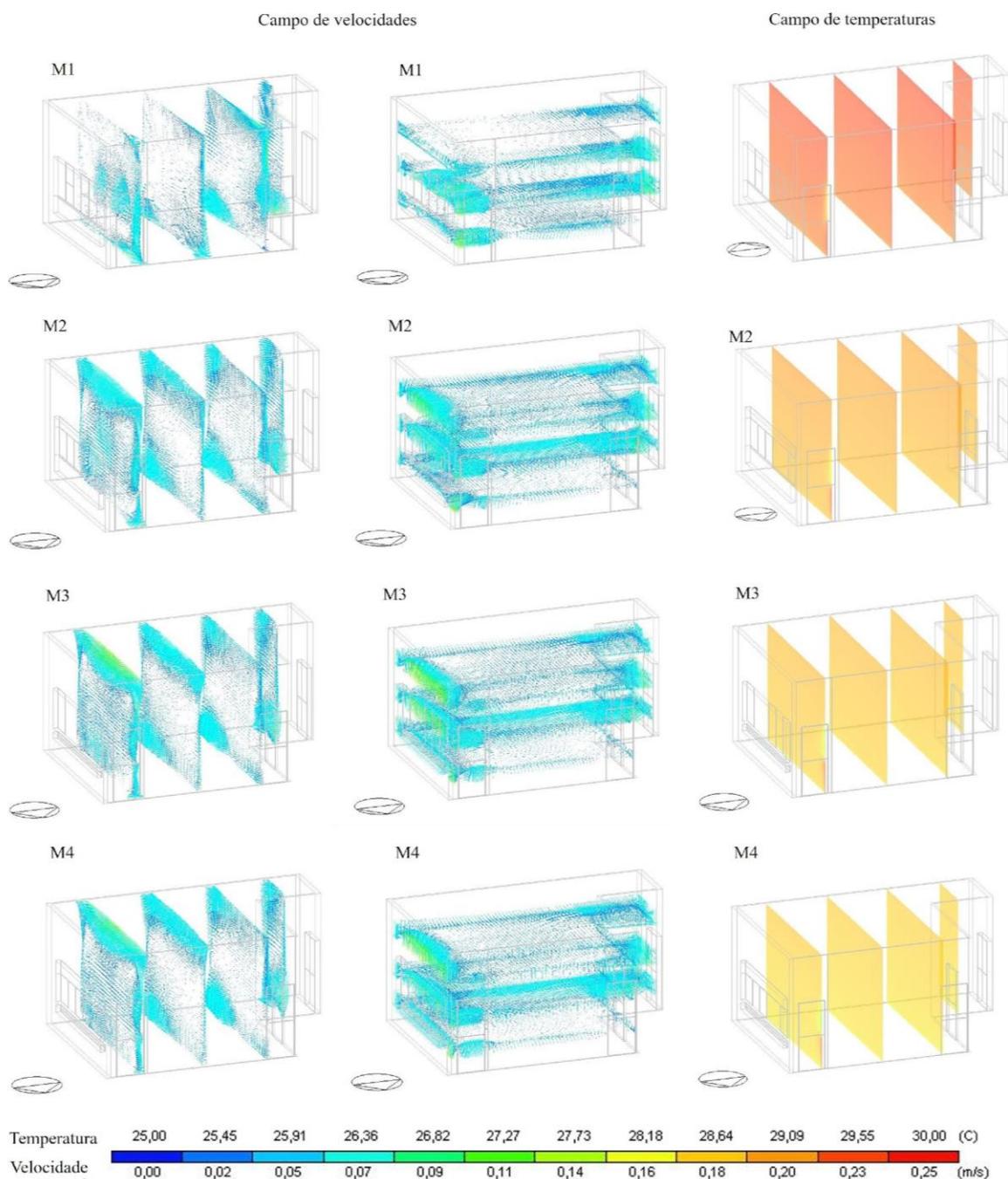


Figura 12 - Campos de velocidade e temperatura do ar na sala de aula orientada a leste, em Belém, no dia 21 de dezembro as 12h00, considerando as configurações da janela padrão (M1) com as diferentes configurações de porta

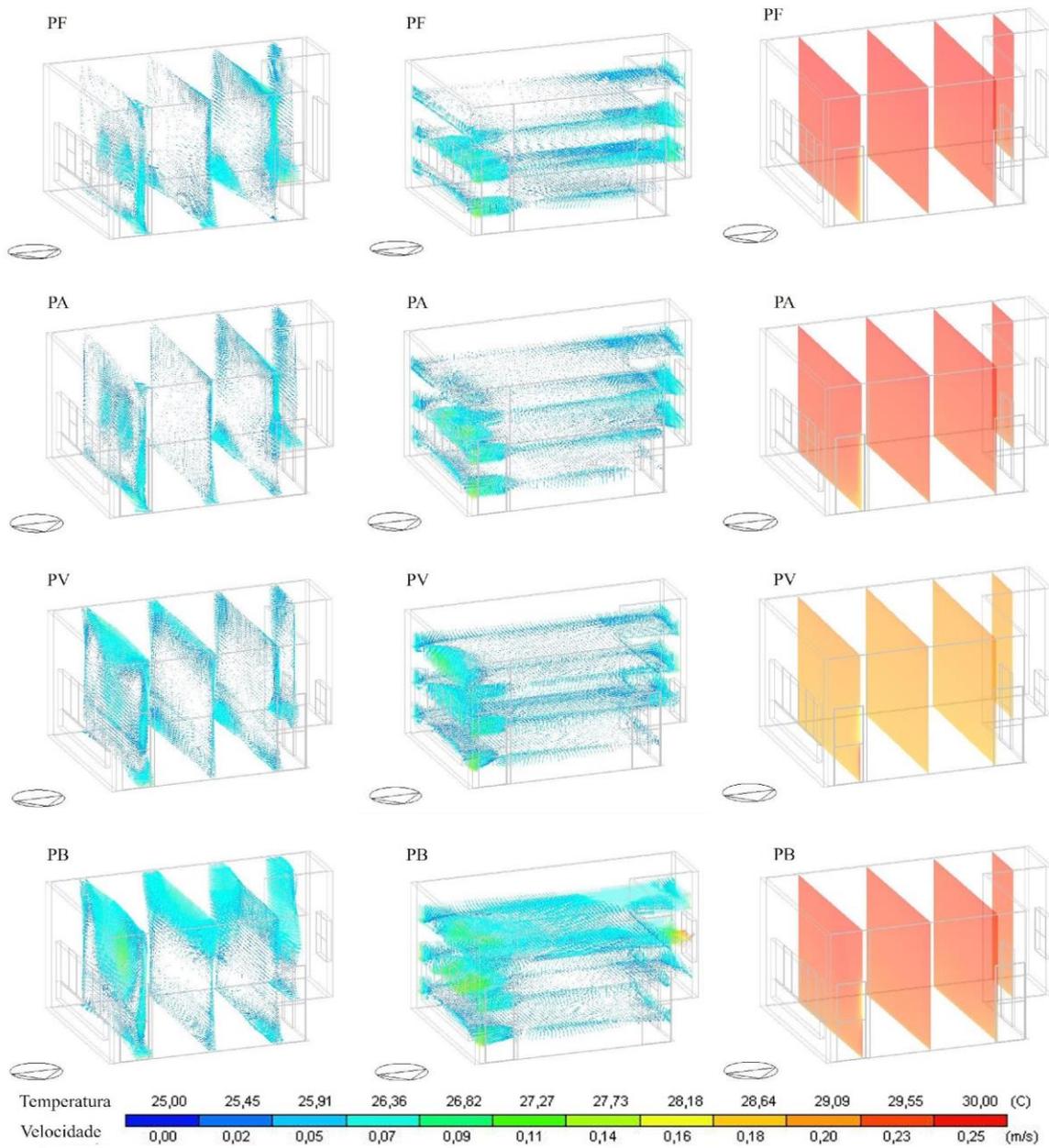
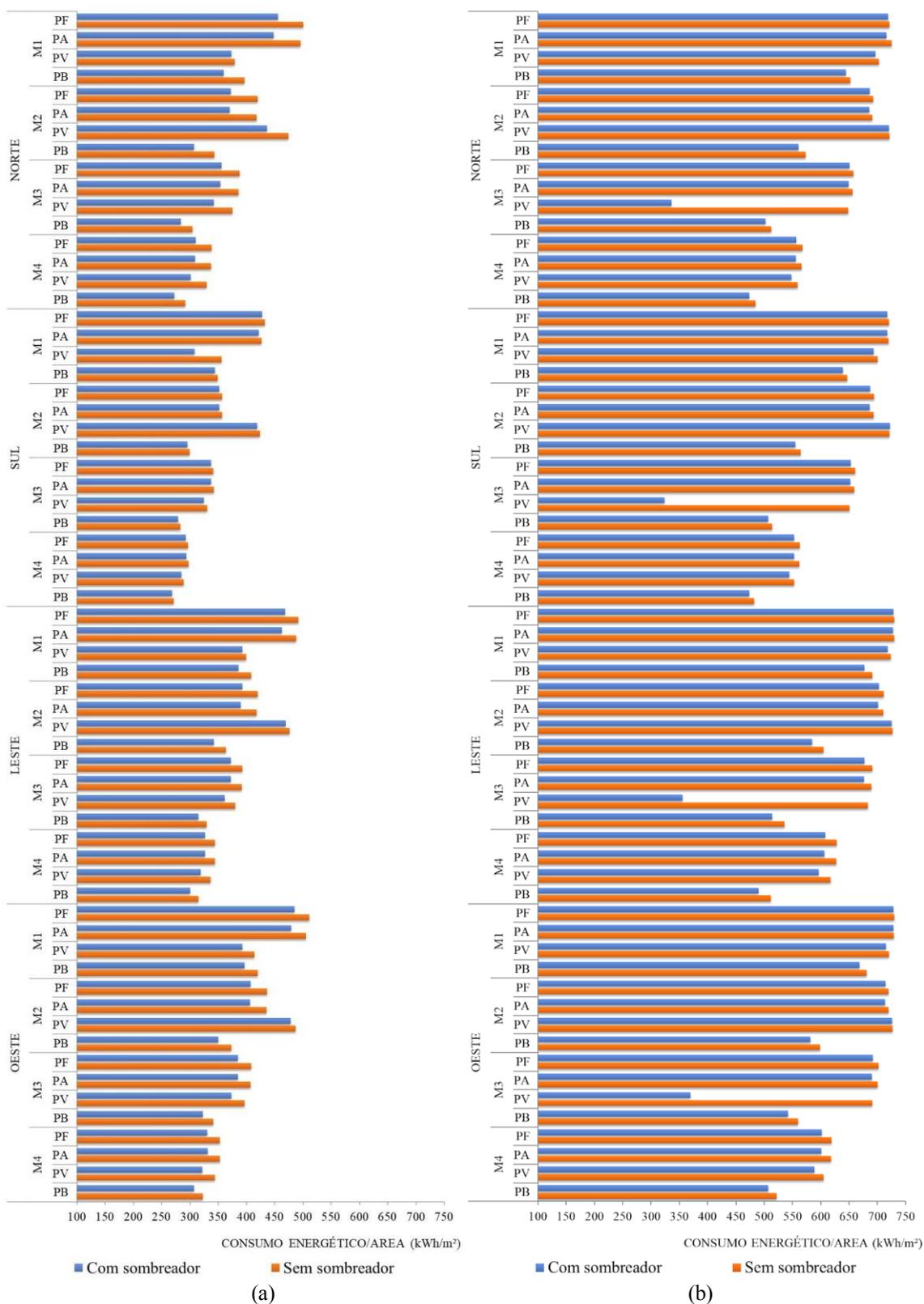


Figura 13 - Consumo de energia (kWh/m<sup>2</sup>) considerando o uso de sistemas de ar condicionado em relação à soma do IDT anual com e sem a presença de sombreadores para (a) Vitória e (b) Belém



De forma geral, como já era esperado, o consumo energético em Belém é significativamente maior do que em Vitória, considerando todas as orientações estudadas. O maior consumo energético encontrado para Belém foi de 730,0 kWh/m<sup>2</sup>, em contraponto a 510,9 kWh/m<sup>2</sup> registrado em Vitória, considerando a situação

mais desfavorável – uso da M1 com a PF na fachada oeste; o que representa um gasto de energia 30% maior da sala de aula, se localizada nessas condições, em Belém do que em Vitória. Analisando as variações do consumo energético entre as tipologias de aberturas e as diferentes orientações do ambiente, percebe-se que no montante estudado o impacto do sombreador não tem uma redução significativa na maioria dos casos na cidade de Belém, variando de 0% a 4% na diminuição do gasto de energia. Entretanto, interessante o fato de que a configuração da janela com peitoril ventilado (M3), associada à porta veneziana (PV), juntamente com o uso dos brise-soleil, diminuiu consideravelmente o consumo energético no ambiente, em todas as orientações estudadas, com 46%, 48%, 48% e 50% de redução, respectivamente, para a sala orientada a oeste, leste, norte e sul, o que mostra uma boa eficiência entre essas associações de aberturas para a região de Belém.

## Conclusão

O objetivo desta pesquisa foi estudar o impacto de diferentes configurações de janelas e portas no desempenho térmico de uma sala de aula, do Programa Proinfância Tipo B, localizada em duas cidades da Zona Bioclimática 8 – Vitória, ES, e Belém, PA.

O peitoril ventilado se mostrou como a melhor estratégia de abertura estudada para aumentar a velocidade do ar nas entradas, reduzindo a temperatura da sala de aula interna, principalmente na zona do usuário. Esse resultado fortalece o uso desse dispositivo como uma solução eficiente e de baixo custo para climas quentes.

Diferenças de tamanho e posição entre as entradas e saídas de ar têm um impacto significativo nos resultados. Em todas as situações analisadas, o melhor desempenho foi registrado pela janela padrão complementada com pivotantes e peitoril ventilado (M4), seguida pela janela com peitoril ventilado (M3), pela janela com pivotantes (M2), e pela janela padrão (M1). Isso é evidenciado pela redução do ITD, FTD e do consumo de energia ao longo do ano, tanto em Belém quanto em Vitória, ocasionado pelo aumento da área de ventilação da janela. A redução do tamanho das saídas de ar, representadas pela porta baía (PB), ampliou a velocidade do ar por essas aberturas na maioria dos casos estudados, aumentou a distribuição e o movimento do ar dentro da sala de aula e, conseqüentemente, diminuiu a temperatura do ar no ambiente.

Em geral, o modelo de janela utilizado pela arquitetura escolar padronizada do Proinfância, com o uso da porta fechada ou aberta, não apresenta um bom desempenho térmico ao longo do ano em climas tropicais quentes, principalmente quando a sala de aula é orientada para oeste.

O uso de dispositivos de sombreamento é mais eficaz na redução da intensidade do desconforto térmico anual e, conseqüentemente, no consumo de energia, em determinadas orientações de sala de aula. O melhor desempenho em Vitória para o uso desse elemento é para a sala de aula orientada a norte. Já em Belém, a configuração da janela com peitoril ventilado (M3), associada à porta veneziana (PV), juntamente com o uso dos brise-soleil, diminuiu consideravelmente a necessidade de climatização e conseqüentemente o consumo energético do ambiente, em todas as orientações estudadas.

O emprego de protetores solares nas janelas diminui o desconforto por calor, mas em relação ao aumento da área de abertura esse artifício não criou diferenças relevantes, principalmente na cidade de Vitória. Para Belém a utilização de estratégias bioclimáticas passivas de ventilação natural diminuiu as temperaturas, entretanto, visando boas condições de conforto térmico no ambiente interno, é necessária a análise em conjunto de outras técnicas que aproveitem as características climáticas do entorno e diminuam a dependência da climatização artificial, tais como uso de materiais de isolamento térmico nas fachadas, fachada ventilada, vegetação, ventiladores mecânicos dentre outros.

Chama-se a atenção também que trabalhos futuros possam confrontar os resultados com a percepção (e preferência) térmica dos usuários das duas cidades, considerando a aclimatação. Por fim, pode-se inferir que o trabalho contribuiu para a análise do desempenho térmico, em uma sala de aula naturalmente ventilada, de diferentes tipologias de aberturas, comumente utilizadas na arquitetura escolar brasileira. Tal fato possibilita identificar as melhores opções a serem selecionadas pelo arquiteto ainda na fase projetual.

## Referências

- ANALYSIS SOL-AR. **Analysis SOL-AR Software**. Versão 6.2. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/software/analysis-sol-ar>. Acesso em: 28 abr. 2021
- ANDREASI, W. A.; LAMBERTS, R.; CÂNDIDO, C. Thermal acceptability assessment in buildings located in hot and humid regions in Brazil. **Building and Environment**, v. 45, n. 5, p. 1225–1232, 2010.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações: parte 1: definições, símbolos e unidades. Brasília, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais. Brasília, 2021.
- ATTIA, S.; CARLUCCI, S. Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. **Energy and Buildings**, v. 102, p. 117–128, 2015.
- BENÍCIO, K. Vitória registra recorde de temperatura da primavera nesta segunda. **A gazeta**, Vitória, 4 nov. 2019. Previsão do tempo, p. 1. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/clima/vitoria-registra-temperatura-maxima-da-primavera-nesta-segunda-1119>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- BITTENCOURT, L. S. *et al.* Estudo do desempenho do peitoril ventilado para aumentar a ventilação natural em escolas de Maceió/AL. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 59–69, jul./set. 2008.
- BUONOCORE, C. *et al.* Thermal preference and comfort assessment in air-conditioned and naturally-ventilated university classrooms under hot and humid conditions in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 211, p. 109783, 2020.
- CARDENAL, M. E. C. **Metodologia para avaliação do desempenho térmico em edificações**: estudo de caso aplicado a edifício habitacional na cidade de Belém do Pará. Belém, 2017. 128 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.
- CONSUL. **Ar condicionado janela 12000 btus Consul frio eletrônico com filtro anti poeira [CCY12EB]**. 2021. Disponível em: <https://www.consul.com.br/produto/ar-condicionado-janela-12-000-btu-eletronico-2/>. Acesso em: 28 abr. 2021
- DE ABREU-HARBICH, Loyde V.; CHAVES, Victor L. A.; BRANDSTETTER, Maria Carolina G. O. Evaluation of strategies that improve the thermal comfort and energy saving of a classroom of an institutional building in a tropical climate. *Building and Environment, [S. l.]*, v. 135, n. November 2017, p. 257–268, 2018.
- DE DEAR, R. *et al.* Adaptive thermal comfort in australian school classrooms. **Building Research and Information**, v. 43, n. 3, p. 383–398, 2015.
- DESIGNBUILDER. **Designbuilder Software**. versão 6.1.0.006. 2019.
- ELSHAFEI, G. *et al.* Numerical and experimental investigations of the impacts of window parameters on indoor natural ventilation in a residential building. **Energy and Buildings**, v. 141, p. 321–332, 2017.
- EUROPEAN STANDARDS COMMITTEE. **EN 15251**: indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. london, 2007.
- FAVAROLO, P. A.; MANZ, H. Temperature-driven single-sided ventilation through a large rectangular opening. **Building and Environment**, v. 40, n. 5, p. 689–699, 2005.
- HABERL, J. S.; CULP, C.; CLARIDGE, D. E. ASHRAE’s Guideline 14-2002 for measurement of energy and demand savings: how to determine what was really saved by the retrofit. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR ENHANCED BUILDING OPERATIONS 15., Pittsburgh, 2005. **Proceedings [...]** Pittsburgh, 2005.
- HASSAN, M. A. *et al.* Investigation of effects of window combinations on ventilation characteristics for thermal comfort in buildings. **Desalination**, v. 209, n. 1/3, p. 251–260, 2007.
- HERACLEOUS, C.; MICHAEL, A. Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period. **Journal of Building Engineering**, v. 26, p. 100917, aug. 2019.
- HOYT, T.; ARENS, E.; ZHANG, H. Extending air temperature setpoints: simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. **Building and Environment**, v. 88, p. 89–96, 2015.
- HWANG, R. L. *et al.* Investigating the adaptive model of thermal comfort for naturally ventilated school buildings in Taiwan. **International Journal of Biometeorology**, v. 53, n. 2, p. 189–200, 2009.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Senso 2010**. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 28 mar. 2021.

- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações automáticas**. 2021. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7726**: ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. Genove, 1998.
- JIANG, J. *et al.* A field study of adaptive thermal comfort in primary and secondary school classrooms during winter season in Northwest China. **Building and Environment**, v. 175, n. 19, 2020.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Seção downloads. Arquivos climáticos em formato EPW. 2019. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads>. Acesso em: 1 mar. 2019.
- LAU, S. S. Y.; ZHANG, J.; TAO, Y. A comparative study of thermal comfort in learning spaces using three different ventilation strategies on a tropical university campus. **Building and Environment**, v. 148, p. 579–599, 2019.
- LIU, X.; YANG, L.; NIU, S. Research on the effect of different position on classroom ventilation in a “L” type teaching building. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101852, May 2021.
- MARTINS, T. A. de L.; BITTENCOURT, L. S.; KRAUSE, C. M. de L. B. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 59–75, abr./jun. 2012.
- MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. **Proinfância**. 2019. Disponível em: <https://www.fnde.gov.br/programas/proinfancia>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Sistema Integrado de Monitoramento e Controle**. 2021. Disponível em: <http://simec.mec.gov.br/painelObras/>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- NICO-RODRIGUES, E. A. *et al.* Quando a janela define a condição de desempenho térmico em ambientes ventilados naturalmente: caso específico das edificações multifamiliares em Vitória, ES. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 7–23, abr./jun. 2015.
- NODA, L. *et al.* Thermal and visual comfort of schoolchildren in air-conditioned classrooms in hot and humid climates. **Building and Environment**, v. 182, p. 107156, 2020.
- PISELLO, A. L.; BOBKER, M.; COTANA, F. A building energy efficiency optimization method by evaluating the effective thermal zones occupancy. **Energies**, v. 5, n. 12, p. 5257–5278, 2012.
- PRAKASH, D.; RAVIKUMAR, P. Analysis of thermal comfort and indoor air flow characteristics for a residential building room under generalized window opening position at the adjacent walls. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 4, n. 1, p. 42–57, 2015.
- PROCELINFO. **Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética**. 2021. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- RAFTERY, P.; KEANE, M.; O'DONNELL, J. Calibrating whole building energy models: an evidence-based methodology. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2356–2364, 2011.
- RORIZ, M. Uma proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- RUIZ, G. R.; BANDERA, C. F.. Validation of calibrated energy models: common erros. **Energies**, v. 10, p. 2–19, 2017.
- SALEH, P. H. Thermal performance of glazed balconies within heavy weight / thermal mass buildings in Beirut , Lebanon ’ s hot climate. **Energy & Buildings**, v. 108, p. 291–303, 2015.
- SEIFERT, J. *et al.* Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 94, n. 12, p. 925–947, 2006.
- SICURELLA, F.; EVOLA, G.; WURTZ, E. A statistical approach for the evaluation of thermal and visual comfort in free-running buildings. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 402–410, 2012.
- SUBHASHINI, S.; THIRUMARAN, K. A passive design solution to enhance thermal comfort in an educational building in the warm humid climatic zone of Madurai. **Journal of Building Engineering**, v. 18, p. 395–407, apr. 2018.

- SUBHASHINI, S.; THIRUMARAN, K. CFD simulations for examining natural ventilation in the learning spaces of an educational building with courtyards in Madurai. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 41, n. 4, p. 466–479, 2020.
- TALEB, H. M. Natural ventilation as energy efficient solution for achieving low-energy houses in Dubai. **Energy and Buildings**, v. 99, p. 284–291, 2015.
- TELI, D. *et al.* thermal performance evaluation of school buildings using a children-based adaptive comfort model. **Procedia Environmental Sciences**, v. 38, p. 844–851, 2017.
- TELI, D.; JAMES, P. A. B.; JENTSCH, M. F. Investigating the principal adaptive comfort relationships for young children. **Building Research and Information**, v. 43, n. 3, p. 371–382, 2015.
- TIAN, H. Z. *et al.* Anthropogenic atmospheric nickel emissions and its distribution characteristics in China. **Science of the Total Environment**, v. 417–418, p. 148–157, 2012.
- TULSYAN, A. *et al.* Potential of energy savings through implementation of Energy Conservation Building Code in Jaipur city, India. **Energy and Buildings**, v. 58, p. 123–130, 2013.
- WANG, D. *et al.* Experimental investigation of the potential influence of indoor air velocity on students' learning performance in summer conditions. **Energy and Buildings**, v. 219, p. 110015, 2020.
- YUN, H. *et al.* A field study of thermal comfort for kindergarten children in Korea: an assessment of existing models and preferences of children. **Building and Environment**, v. 75, p. 182–189, 2014.

**Érica Coelho Ragel**

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Cidade | Universidade Vila Velha | Av. Comissário José Dantas de Melo, 21, Boa Vista | Vila Velha - ES - Brasil | CEP 29102-920 | Tel.: (27) 3421-2026 | E-mail: erica.pagel@uvv.br

**Gilda Laysa de Oliveira Gouveia**

Departamento de Engenharia Civil | Instituto Federal do Norte de Minas Gerais | Av. Humberto Mallard, 1355, Santos Dumont, Campus Pirapora | Pirapora - MG - Brasil | CEP 39270-000 | Tel.: (38) 3749-6950 | E-mail: gilda.gouveia@ifnmg.edu.br

**Ramon Silva Martins**

Departamento de Engenharia Mecânica | Universidade Federal do Espírito Santo | Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras | Vitória - ES - Brasil | CEP 29075-910 | E-mail: ramon.martins@ufes.br

**Marcos Vinícius Gualberto da Cruz**

Departamento de Engenharia Mecânica | Universidade Vila Velha | Av. Comissário José Dantas de Melo, 21, Boa Vista | Vila Velha - ES - Brasil | CEP 29102-920 | E-mail: marcosvgualberto@gmail.com

**Ambiente Construído**

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído  
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro  
Porto Alegre - RS - Brasil  
CEP 90035-190  
Telefone: +55 (51) 3308-4084  
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido  
www.scielo.br/ac  
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.