

Naturally ventilated industrial sheds: an investigation about the influence of wind direction in flow rate efficiency in continuous roof vents

Bruno Camargos¹, HENOR DE SOUZA¹, Adriano Gomes², Artur Ladeira¹, Reinaldo Antonio dos Reis¹, Lidianne de Paula Pinto Mapa¹

1 Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

2 Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)

Abstract

Natural ventilation portrays an effective technique for lowering the internal temperature, without spending electricity, and directly contributes to the renewal of indoor air by establishing a healthy environment for workers. Given this, it is usual to have air vent openings located at the top of the roof (continuous roof vents), in addition to those present on the facades of sheds. In naturally ventilated buildings, it is recommended to give due importance to the provision of these openings, since depending on the proposed arrangement, the wind may or may not help in the effectiveness of this strategy. In this work, it is evaluated via computer simulation (EnergyPlus, version 8.7.0), for the climatic conditions of the city of Belo Horizonte/Brazil, the influence of the wind direction in the flow rate of indoor air through the ridge vents, of the longitudinal and transversal type, present in industrial sheds endowed with an internal source of high-intensity heat release. The results obtained show that the flow rate has a symmetrical behavior in the openings of the longitudinal continuous roof vent, that is, when an opening is with the maximum outflow of the internal air, the opening opposite the predominant wind direction is acting as an entry point for the air external. The transverse continuous roof vents are more sensitive about the wind direction since they are positioned perpendicular to the building. The best result found is for the wind situation occurring parallel to the shed, obtaining a reduction in the internal temperature of up to 1°C, an increase in the rate of air changes per hour, in the internal environment, at 1acph, and an increase of up to 10,7% in the volume of air infiltrated into the shed.

OPEN ACCESS

Published: 27/01/2021

Accepted: 21/01/2021

DOI:
10.23967/j.rimni.2021.01.007

Keywords:
Industrial sheds
Natural ventilation
Thermal performance
EnergyPlus

Resumo

A ventilação natural retrata uma técnica eficaz na diminuição da temperatura interna, sem gastos de energia elétrica, e contribui diretamente para a renovação do ar interno estabelecendo também um ambiente saudável aos trabalhadores. À vista disso, é usual a presença de aberturas para saída de ar localizadas no topo da cobertura (lanternins), além daqueles presentes nas fachadas de galpões. Nessas edificações naturalmente ventiladas, é recomendável que se dê devida importância à disposição dessas aberturas, uma vez que a depender do arranjo proposto, o vento pode auxiliar ou não na eficácia dessa estratégia. Neste trabalho, avalia-se via simulação computacional (EnergyPlus, versão 8.7.0), para as condições climáticas da cidade de Belo Horizonte/Brasil, a influência da direção do vento na vazão do ar interno através dos lanternins, do tipo longitudinal e transversal, presentes em galpões industriais dotados de fonte interna liberadora de calor de alta intensidade. Os resultados obtidos mostram que a vazão possui comportamento simétrico nas aberturas do lanternim longitudinal, ou seja, quando uma abertura está com a máxima vazão de saída do ar interno, a abertura oposta à direção predominante do vento está atuando como ponto de entrada para o ar externo. Já os lanternins transversais mostram-se mais sensíveis em relação à direção do vento, posto que estão posicionados perpendicularmente à edificação. O melhor resultado encontrado é para a situação do vento incidindo paralelamente ao galpão, obtendo-se uma redução na

temperatura interna de até 1°C, aumento na taxa de renovação de ar por hora, no ambiente interno, em 1ren/h, e um acréscimo de até 10,7% no volume de ar infiltrado para o interior do galpão.

Palavras-Chave: Galpões industriais, ventilação natural, desempenho térmico, energyPlus

1. Introdução

A ventilação natural é uma dessas estratégias de condicionamento bioclimático, que sob várias condições, pode retratar uma técnica eficaz na diminuição da temperatura interna, provocando uma grande economia de energia, especialmente em se tratando de um ambiente industrial [1,2]. Dessa forma, uma investigação acerca do emprego de lanternins e do condicionamento térmico passivo por meio da ventilação natural, especialmente quando se trata de galpões industriais ou edificações dotadas de grandes coberturas, torna-se uma alternativa bastante relevante como forma de maximizar o desempenho térmico dessas construções [3-6].

O lanternim é a sobrelevação da cobertura da edificação, dotado de aberturas laterais, que tem por função permitir a saída do ar quente instalado no interior das edificações [7,8]. O ar, da mesma forma que qualquer outro gás, quando aquecido, mantém a sua massa, porém, aumenta seu volume tornando-se menos denso (mais leve) [9]. Devido a isso, quando em

compartimentos fechados, esse ar quente tende a buscar as regiões mais altas, deslocando-se para o exterior do recinto pelas passagens da cobertura (lanternins, por exemplo); e o ar frio externo (mais pesado), tende a se deslocar para o interior do edifício, ocupando assim o lugar do ar quente, caracterizando o que o chamado efeito chaminé. Esse efeito torna-se perceptível com um pequeno diferencial de temperatura no interior das edificações [10,11].

A influência da ventilação natural no desempenho térmico das edificações tem sido amplamente pesquisada por diversos autores, destacam-se os trabalhos de: Mazon *et al.* [10], Heravi *et al.* [12], Tinôco [13], Gourlis e Kovacic [14], Chang *et al.* [15], Antonini *et al.* [16], Shi [17], Tien e Calautit [18], Rahmatmand *et al.* [19] e Sousa *et al.* [20]. Quanto à influência da direção do vento no desempenho térmico das edificações ressalta-se a importância de alguns trabalhos, tais como o de Yi *et al.* [21] que investigaram via CFD o impacto da velocidade e direção do vento externas no coeficiente de descarga da abertura da parede lateral de barlavento para o modelo de galpão naturalmente ventilado analisado. Esses autores ressaltam que o coeficiente de descarga das aberturas não foi afetado pela velocidade do vento externo, mas variou consideravelmente com a direção do vento. Teitel *et al.* [22] avaliaram via testes num túnel de vento e CFD os efeitos, padrões de fluxo e a distribuição da temperatura do ar, também num modelo de galpão naturalmente ventilado. Os autores mostraram haver um efeito significativo da direção do vento nos padrões de fluxo tanto no interior do galpão quanto nas aberturas de ventilação localizadas na cobertura. Além disso, os mesmos ressaltam que a direção do vento afetou significativamente a taxa de ventilação e as distribuições de temperatura do ar.

Lukiantchuki *et al.* [23] avaliaram via CFD a influência da variação na geometria dos *sheds* e na dimensão das aberturas de entrada e saída de ar no desempenho da ventilação natural. O sistema foi avaliado para os ângulos de incidência dos ventos externos de 0° e 45° (extração) e 135° e 180° (captação). Foram realizadas análises quantitativas (taxas de renovação de ar/hora e coeficiente de pressão nas aberturas) e qualitativas (planos de contorno e vetores de direção e intensidade do fluxo de ar). Os resultados desses autores indicam que *sheds* com geometrias aerodinâmicas e o aumento das aberturas de saída de ar incrementam o fluxo de ar interno. Para os *sheds* captadores, o aumento isolado das aberturas de entrada de ar não proporciona uma melhora significativa na captação dos ventos pela cobertura. Soleimani *et al.* [24] apresentam uma análise climática de um edifício de cúpula geodésico, naturalmente ventilado, situado num clima quente. Foram simuladas via CFD as distribuições de fluxo de ar, a temperatura dentro do edifício e o nível de conforto térmico foi avaliado utilizando-se o método de voto médio previsto. Os resultados dos autores mostram que a integração das aberturas do telhado é bastante vantajosa e contribui na redução da temperatura interna e na introdução de ar fresco para o interior da edificação, principalmente durante o inverno. Os resultados também revelaram que a ventilação natural usando aberturas de teto não podem satisfazer os requisitos térmicos durante os períodos de verão, e potenciais soluções de resfriamento que devem ser integradas.

Alguns outros trabalhos se destacam frente à avaliação da influência da direção do vento no desempenho térmico de galpões. Baeza *et al.* [25] investigaram via CFD a relação entre o tamanho do ventilador mecânico provedor da ventilação natural para o interior do galpão com as taxas de renovação do ar. Os mesmos concluíram que existe uma interligação muito dependente do tamanho do ventilador, ou seja, das correntes de ar incidentes, com o número de trocas do ar interno e a largura das aberturas quando majoradas. Além disso, os

autores também ressaltam que as aberturas de ventilação do tipo *Flap vents* mostraram-se mais eficientes do que as aberturas do tipo rolling vents e forneceram taxas de ventilação para velocidades médias do vento que estavam próximas às propostas como ótimas nas literaturas consultadas. Baeza *et al.* [26] realizaram simulações de CFD bidimensionais para estudar o efeito do número de vãos em um galpão com quatro configurações diferentes de uma cobertura ventilada. Os autores concluíram que todas as configurações simuladas apresentaram uma queda importante na taxa de ventilação (ren/h) à medida que o número de vãos aumentava, porém os valores aumentaram novamente nos modelos de 10 e 15 vãos com as configurações de ventilação do tipo alternada e dupla. Baptista *et al.* [27] avaliaram a influência da velocidade e da direção do vento e da diferença de temperatura entre dentro e fora do modelo de galpão avaliado, isso em função da posição de um ventilador mecânico. Os autores concluíram que a diferença de temperatura afetou as taxas de ventilação sob baixas velocidades de vento. Além disso, para cada posição do ventilador, a taxa de renovação do ar se manteve linearmente dependente da velocidade do vento.

Em linhas gerais, é sabido que a ventilação natural no setor industrial contribui diretamente para o estabelecimento de um ambiente de trabalho mais saudável a todos os trabalhadores, a partir da renovação constante do ar interno, resultando em uma melhor condição de conforto térmico [28]. Além dos benefícios diretos para o bem-estar do trabalhador, tem-se também uma considerável economia, uma vez que o uso da ventilação natural dispensa o emprego de equipamentos elétricos, como aparelhos condicionadores de ar [29].

Portanto, no caso das edificações naturalmente ventiladas, é recomendável que se dê devida importância à disposição das aberturas provedoras da ventilação natural, uma vez que a depender do arranjo proposto, o vento pode auxiliar ou não na eficácia dessa estratégia [30]. Chu e Lan [31] afirmam que para a direção do vento quando advinda de $\theta = 180^\circ$ tende-se a aumentar substancialmente a taxa de ventilação do galpão multi-vão por eles estudados, em comparação com a ventilação advinda de $\theta = 0^\circ$. Em outras palavras, os autores sugerem aproveitar ao máximo a ventilação natural, levando em consideração a direção predominante do vento do local [32,33].

Neste artigo, avalia-se por meio de um modelo geométrico, via simulação computacional, a influência da direção do vento na eficiência da vazão de lanternins (do tipo longitudinal e transversais) presente em galpões industriais dotados de fonte interna de calor de alta intensidade. A tipologia arquitetônica do galpão estudado possui características semelhantes à maioria das edificações industriais situadas na cidade de Belo Horizonte/Brasil, a saber: cobertura de duas águas de telhas metálicas simples, abertura para entrada de ar nas duas fachadas laterais e a presença de lanternim do tipo longitudinal localizado no topo da cumeeira.

2. Método

A metodologia de investigação utilizada se dá a partir da realização de variações paramétricas com o uso da ferramenta de simulação computacional *EnergyPlus* por meio de um modelo computacional base de um galpão industrial. As atividades deste artigo são ordenadas da seguinte maneira: a) Definição de um modelo geométrico representativo de um galpão industrial; b) Definição dos materiais de fechamento e cobertura; número e dimensionamento das aberturas de entrada de ar e do lanternim do modelo base; c) Simulação parametrizada das variáveis (direções predominantes do vento) e d) Avaliação da influência da direção do vento predominante na eficiência de vazão nos lanternins.

2.1 Sobre o galpão industrial simulado

Estuda-se um galpão industrial equipado com uma fonte interna liberadora de calor de alta intensidade por meio de um modelo computacional, situado no contexto climático brasileiro na região da cidade de Belo Horizonte/Brasil (Tabela 1).

Tabela 1. Localização geográfica da cidade de Belo Horizonte/MG/Brasil [34]

| País | UF | Zona Bioclimática | Cidade | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|--------|----|-------------------|----------------|----------|-----------|--------------|
| Brasil | MG | ZB3 | Belo Horizonte | 19,93S | 49,93W | 850 |

Partindo desse pressuposto e baseado nos materiais comumente encontrados na região dessa cidade, bem como na disponibilidade e acessibilidade no comércio, encontra-se na Tabela 2 os materiais de construção constituintes da envoltória do galpão industrial.

Na Tabela 3 apresenta-se as informações adicionais relativas à caracterização das cargas térmicas internas deste galpão industrial proposto e analisado. Adota-se uma fonte de calor com potência nominal de 1MW, caracterizando uma indústria de médio porte [35] e para a iluminação artificial um nível de 500lux, ou seja, 30W/m², que resulta num calor total liberado de 89.938,8W e uma ocupação com 45 funcionários em atividades moderadas com uma taxa metabólica de 175W cada um [36].

Tabela 2. Características termofísicas e absorvância dos materiais de construção do galpão industrial (Adaptado de [37,38])

| Material | Rugosidade | Espessura (cm) | Condutividade de κ (W/m.K) | Densidade e ρ (kg/m ³) | Calor específico c (J/kg.K) | * α térmica | * α solar | * α visível |
|---|--------------|----------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Parede de alvenaria (até 3 metros de altura) | | | | | | | | |
| Bloco de concreto furado | Médio rugoso | 20,0 | 0,57 | 1.040,0 | 830,0 | 0,9 | 0,6 | 0,6 |
| Argamassa de reboco | Médio rugoso | 2,0 | 0,72 | 1.860,0 | 830,0 | 0,9 | 0,5 | 0,5 |
| Piso | | | | | | | | |
| Concreto | Rugoso | 10,0 | 1,75 | 2.400,0 | 1.000,0 | 0,9 | 0,7 | 0,7 |
| Cobertura, Fechamento metálico lateral e Lanterna | | | | | | | | |
| Chapa em aço galvanizada | Liso | 0,2 | 55,0 | 7.800,0 | 460,0 | 0,9 | 0,25 | 0,25 |

* α = absorvância

Tabela 3. Cargas térmicas assumidas para o galpão industrial (Autoria própria)

| Fonte interna liberadora de calor (W) | Iluminação (W) | Pessoas (W) |
|---------------------------------------|----------------|-------------|
| 1.000.000,0 | 89.939,8 | 7.875,0 |

2.2 Modelo geométrico adotado

A simulação computacional é feita considerando-se um modelo de galpão industrial com 3.000m² (tendo por dimensões de base 30m de largura × 100m de comprimento). Sua forma é composta por um prisma retangular com fechamento superior por cobertura com planos inclinados. A altura do volume varia de 9m na parte mais baixa até 13,50m no trecho da cumeeira, gerando um volume de ar de aproximadamente 33.000m³.

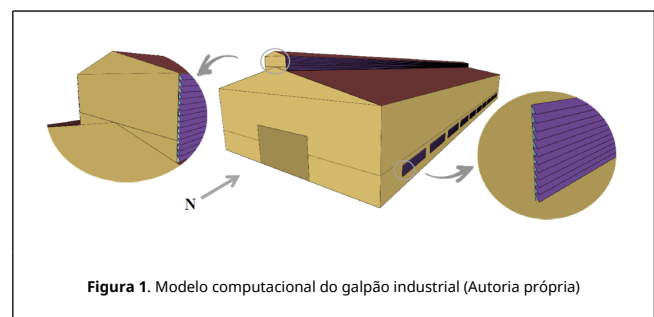
O dimensionamento das aberturas de entrada e saída de ar são feitas conforme sugerem Clezar e Nogueira [11] resultando em uma vazão necessária de 122,13m³/s e 20 aberturas para entrada de ar, tendo cada uma 8,54m² e 42,69m² de área para saída de ar (aproximadamente 0,50m de altura para o lanternim); essa altura do lanternim é corrigida com os coeficientes redutores de área previstos no método IVN apresentado por Scigliano e Hollo [39], obtendo um lanternim de 1,50m situado no topo da cumeeira do galpão ao longo de toda sua extensão. Isso se faz necessário, uma vez que todas as aberturas estão munidas de aparatos para permitir a entrada de luz e protegê-las contra a chuva. Tais informações

encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Dimensão das aberturas para entrada do ar e do lanternim (Autoria própria)

| Vazão (m ³ /s) | Área de entrada de ar (m ²) | Área de saída de ar (m ²) | Altura corrigida do lanternim (m) |
|---------------------------|---|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 122,13 | 85,40 (7,20 × 1,20)m | 42,69 (0,50 × 1,00)m | 1,50 |

Na Figura 1 mostra-se o modelo geométrico do galpão industrial, bem como tem-se os detalhes do lanternim e abertura munido das venezianas industriais. O modelo geométrico do galpão industrial é desenhado com o auxílio do *plug-in Euclid* que é uma extensão gratuita para o *Sketch-Up* baseada na extensão do *Legacy OpenStudio* que permite a exportação do desenho a partir de coordenadas geométricas, salvando este no formato .idf, que é compatível com o *software EnergyPlus*.



Neste artigo, leva-se em consideração a simulação de um ambiente de trabalho industrial. Entende-se como uma área típica de trabalho nessa tipologia um ambiente de grandes dimensões e sem divisão física entre os postos de trabalho. Portanto, tratando-se de um local sem obstruções e composto de uma massa de ar homogênea, define-se uma única zona térmica para cálculo.

2.3 Abordagem computacional

O *EnergyPlus* [40] (versão 8.7.0) é um *software* de simulação de carga térmica e análise energética, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, baseado em outros dois softwares antecessores, o BLAST e o DOE-2. A partir da versão 1.3.0 do programa, o modelo de cálculo do fluxo de ar passou a ser nomeado de *AirflowNetwork*. Nesse objeto, o cálculo do fluxo de ar acontece entre as zonas e o exterior das frestas e das aberturas levando-se em consideração as características do entorno da edificação, as condições de abertura das janelas e portas e as condições de ventilação. Os coeficientes de pressão são calculados automaticamente pelo programa, uma vez que, trata-se de uma edificação com geometria retangular, condição essa limitante para tal [41].

As simulações computacionais são configuradas para se realizar com a situação de ventilação constante e fator de abertura 1 (100%) para todas as aberturas de entrada de ar e lanternim, sendo os portões considerados sempre fechados (fator de abertura 0). Devido à utilização dos aparatos de entrada de luz e proteção contra chuva, do tipo venezianas industriais, presentes em todas as aberturas (Figura 1), o coeficiente de vazão de cada área é igual a 0,40 conforme recomenda Idel'cik [42]. O método de inicialização linear é escolhido, pois se adequa à simulação de ventilação por efeito chaminé e tende a estabelecer uma direção adequada para o fluxo de ar durante a simulação.

2.3.1 Método do balanço de energia

O balanço de energia para cada elemento da edificação no

programa *EnergyPlus*, envolve os processos de condução através da envoltória e de convecção e radiação que ocorrem nas superfícies internas e externas. Os ganhos de calor internos com o sistema de iluminação, sistema de condicionamento de ar, equipamentos e pessoas são de extrema importância para o cálculo do balanço térmico na edificação. As superfícies interagem com o balanço térmico do ar da zona por convecção. O balanço térmico do ar envolve o processo de convecção em relação às cargas internas, ao ar que o sistema de condicionamento de ar insere na zona e ao sistema de ventilação e infiltração presentes na zona. O cálculo da temperatura interior é efetuado com base num balanço energético, onde são incluídas as componentes que traduzem as trocas de calor com a zona em estudo [41,43]. Assim, tem-se a Eq. (1) que traduz o balanço de calor:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_\infty - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (1)$$

onde:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de energia armazenada no interior da zona térmica (W);

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ é a soma dos ganhos internos por convecção (W);

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ é a transferência de calor por convecção originária das superfícies existentes na zona térmica (W);

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z)$ é a transferência de calor devido à mistura do ar entre as zonas térmicas (W);

$\dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_\infty - T_z)$ é a transferência de calor devido a infiltração do ar externo (W);

\dot{Q}_{sys} é a taxa de troca de calor entre o ar da zona e o sistema de climatização (W);

T_z é a temperatura da zona (K);

T_{zi} é a temperatura das zonas vizinhas (K);

T_∞ é a temperatura do ar infiltrado (K);

T_{si} é a temperatura das superfícies existentes na zona (K);

h_i é o coeficiente de troca de calor (W/m².K);

A_i é a área superficial (m²).

O *EnergyPlus* oferece três opções de algoritmo para cálculo de coeficiente de convecção em superfícies internas e cinco opções para superfícies externas. Todos os algoritmos foram testados por Neves e Roriz [44] visando simular uma chaminé solar como indutor de ventilação natural nas edificações tendo o funcionamento induzido pelo efeito chaminé, sendo escolhido para tal o algoritmo TARP (*Thermal Analysis Research Program*) tanto para as superfícies internas quanto para as externas. Esse algoritmo correlaciona o coeficiente de transferência de calor com a orientação da superfície e a diferença entre a

temperatura do ar na zona térmica e na superfície. Nesse adotam-se equações de transferência de calor por convecção natural para superfícies horizontais, verticais ou inclinadas, voltadas para cima quando aquecidas ou para baixo quando resfriadas [41].

O método de inicialização linear é escolhido, pois se adequa à simulação de ventilação por efeito chaminé e tende a estabelecer uma direção adequada para o fluxo de ar durante a simulação [41]. Nele, os valores iniciais para fluxo mássico (\dot{m}) são obtidos por uma aproximação linear, relacionando fluxo de ar com a queda de pressão dado pela Eq. (2):

$$\dot{m} = C_i \rho \left(\frac{\Delta p}{\mu} \right) \quad (2)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica (kg/s); C_i é o coeficiente de fluxo mássico (m³); ρ é a densidade do ar (kg/m³); Δp é a diferença de pressão entre dois nós considerados (Pa); μ é a viscosidade do ar (Pa.s).

2.3.2 Simulação da ventilação natural

A ventilação natural pode ser simulada no *EnergyPlus* de maneira simplificada, definindo-se uma vazão nominal de ar e um *schedule* (padrão de uso e operação da edificação e seus sistemas); ou por meio do módulo *AirflowNetwork* (modelo de rede).

No modelo de rede de infiltração multizona, a edificação é descrita como uma rede de zonas interconectadas pelas aberturas (*links*), ou seja, a edificação é tomada como uma rede de campos de pressão. Cada nó (*zona*) representa um espaço com condições de pressão uniforme dentro ou fora da edificação e a interconexão dos nós corresponde aos impedimentos ao fluxo de ar. Esses nós de pressão ou zonas são conectados por resistências não-lineares. Os modelos de rede baseiam-se na conservação de massa em cada uma das zonas da edificação, operando assim com um sistema não-linear de equações de pressão. A saber, os modelos de rede trabalham com valores únicos de pressão para cada zona térmica e fachadas, tornando assim impossível estimar com precisão a velocidade e a movimentação do ar, em contrapartida, esse modelo permite verificar os efeitos da ventilação natural para períodos prolongados de análise, o que torna este modelo de cálculo relativamente mais simples [41,45].

Para o cálculo das taxas de infiltração e ventilação se faz necessário solucionar um sistema de equações não lineares, e isso é feito por meio do método iterativo de *Newton-Raphson*. Esse número de iterações é definido pelo usuário, tendo como valores usuais 1 ou 2, sendo 500 iterações o limite máximo para se encontrar uma solução para o fluxo de ar [45]. A equação do balanço dos fluxos de massa para a *m*-ésima zona com o total de j_m aberturas é obtida pela Eq. (3):

$$\sum_{i=1}^{j_m} \rho_{im} Q_{im} = 0 \quad (3)$$

onde ρ_{im} é a densidade do ar da *i*-ésima abertura do *m*-ésimo nó (kg/m³); Q_{im} é a vazão volumétrica do ar através da *i*-ésima abertura do *m*-ésimo nó (m³/s);

A vazão volumétrica através da *i*-ésima abertura do *m*-ésimo nó é dada pela Eq. (4):

$$Q_{im} = C_{im} |P_{im} - P_m|^{n_{im}} \left(\frac{P_{im} - P_m}{|P_{im} - P_m|} \right) \quad (4)$$

onde Q_{im} é a vazão volumétrica do ar através da i -ésima abertura do m -ésimo nó (m^3/s); C_{im} é o coeficiente de descarga da i -ésima abertura da m -ésima zona (adimensional); n_{im} é o expoente do fluxo da i -ésima abertura da m -ésima zona; p_{im} é a pressão da zona adjacente ao m -ésimo nó por meio do qual a i -ésima abertura se conecta (Pa); p_m é a pressão interna do m -ésimo nó (Pa).

A equação do equilíbrio é aplicada em cada zona. Assumindo um número total de "q" zonas, o balanço total é dado pela Eq. (5):

$$\sum_{im=1}^q \sum_{im=1}^{j_m} \rho_{im} k_{im} |p_{im} - p_m|^{n_{im}} \left(\frac{P_{im} - P_m}{|P_{im} - P_m|} \right) = 0 \quad (5)$$

O programa pode calcular automaticamente os C_p 's (Coeficientes de Pressão do Vento). Em contrapartida, é necessário que a edificação possua em planta formato retangular. Nesse caso, os valores de C_p 's médios da superfície, são calculados pelo programa para as quatro fachadas verticais e para a cobertura, com base nos dados fornecidos pelo usuário, a saber: relações entre altura, largura e comprimento da edificação; orientação solar e razão entre o menor e o maior comprimento do edifício [45,46]. Sendo uma edificação de pequeno porte, o coeficiente de pressão superficial normalizado é obtido pela Eq. (6) [47 apud 41]:

$$C_{p,n} = 0, \quad 6.l_n \left[\frac{1,248 - 0,703\sin(\alpha/2) - 1,175\sin^2(\alpha) + 0,131\sin^3(2\alpha)}{+0,769\cos(\alpha/2) + 0,07G^2\sin^2(\alpha/2) + 0,717\cos^2(\alpha/2)} \right] \quad (6)$$

onde $C_{p,n}$ é o valor de C_p em um determinado ângulo entre a direção do vento e a normal da superfície em consideração (adimensional); α é o ângulo entre a direção do vento e a normal externa da parede em consideração (graus); G é o logaritmo natural da relação entre a largura da parede em consideração e a largura da parede adjacente (adimensional); n é o índice do ângulo de incidência em incrementos de 30 graus.

Nesse pressuposto a vazão de ar num determinado ambiente pode ser denotada por Q , e definida por uma vazão adimensional Q' como mostra a Eq. (7):

$$Q' = [a_p | \Delta C_p | + a_\sigma \sigma_{\Delta C_p}]^{1/2} + a_s U_L \quad (7)$$

onde: a_p , a_σ e a_s são constantes; U_L é uma velocidade de referência tomada como a velocidade do vento não perturbada U_{ref} numa altura de referência; ΔC_p e $\sigma_{\Delta C_p}$ são os termos de diferença de pressão média e flutuante do coeficientes de pressão descritos como:

$$\Delta C_p = \frac{\bar{\Delta p}}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2}, \quad (8)$$

$$\sigma_{\Delta C_p} = \frac{\sigma_{\Delta p}}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2}, \quad (9)$$

Sendo a densidade do ar ambiente e,

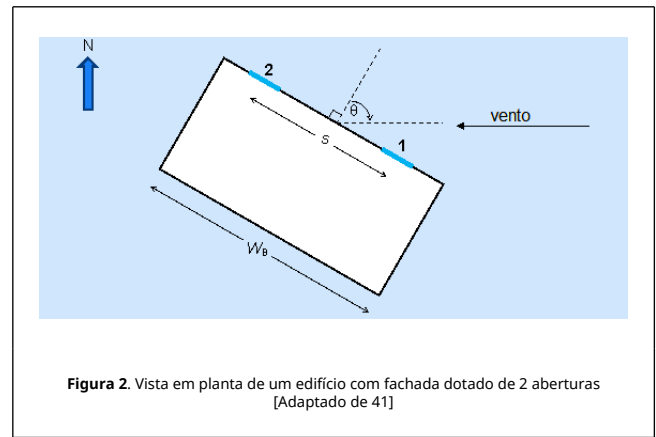
$$U_L = \frac{U_L}{U_{ref}} \quad (10)$$

$a_s = 0$ para o caso de duas aberturas e $a_p = a_\sigma = 0$ para o caso de uma única abertura.

Na Figura 2 mostra-se a geometria deste caso em vista de planta. As duas aberturas estão a uma distância s separados em uma fachada de largura W_b cuja normal tem ângulo azimutal φ_n . A direção azimutal do vento é φ_w , de modo que sua direção em relação à fachada é dada pela Eq. (11):

$$\theta = \varphi_w - \varphi_n \quad (11)$$

Nestas definições, $0^\circ \leq \varphi_n, \varphi_w \leq 360^\circ$, enquanto $|\theta| \leq 180^\circ$. Observe que se θ inicialmente ficar fora da faixa indicada, ele deve ser substituído pelo sinal $(\theta)[|\theta| - 360^\circ]$.



Em suma, as cargas calculadas pelo módulo *AirflowNetwork* estão integradas na equação do balanço de calor do *EnergyPlus* como mostrado na Eq. (1). São incluídas nessa equação as somatórias de vazão mássica e cargas sensíveis e latentes no cálculo da temperatura e umidade da zona. Dessa forma, a equação atualizada da temperatura da zona revisada é dada pela Eq. (12):

$$z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + MCPT_{airflow} + \dot{m}_{sys} C_p T_{supply} + QAD}{\frac{11}{6} \frac{C_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A + MCP_{airj}} \dot{m}_{sys} C \quad (12)$$

onde $MCPT_{airflow}$ é a soma do fluxo de massa multiplicado pelo calor e temperatura específicos para infiltração e mistura (W); $QADS_z$ é a carga sensível total adicionada na zona devido à perda de distribuição de ar do sistema (W) e $MCP_{airflow}$ é a soma da taxa de massa multiplicada pelo calor específico para a infiltração e mistura (W/K); conforme calculado no módulo *AirflowNetwork* como mostra as Eq. (13) e Eq. (14):

$$MCP_{airflow} = \dot{m}_{inf} C_p + \sum (\dot{m}_{mix} C_p) \quad (13)$$

$$MCPT_{airflow} = \dot{m}_{inf} C_p T_{amb} + \sum (\dot{m}_{mix} C_p T_{zone}) \quad (14)$$

onde \dot{m}_{inf} é a taxa de massa de ar de entrada do exterior (kg/s); \dot{m}_{mix} é a taxa de massa de ar de entrada das zonas adjacentes (kg/s); T_{amb} é a temperatura de bulbo seco ao ar livre (°C); T_{zone} é a temperatura do ar da zona adjacente (°C).

A carga sensível do sistema de distribuição de ar de cada zona é obtida por meio da Eq. (15):

$$Q_{ADS,i} = \sum_j Q_{cond(i,j)} + \sum_j Q_{leak(i,j)} \quad (15)$$

onde $Q_{cond(i,j)}$ é a perda de condução da parede do duto j ésimo localizado na i ésima zona (W); $Q_{leak(i,j)}$ é a perda de vazamento de suprimento sensível na j ésima ligação localizada na i ésima zona (W).

Em linhas gerais, no módulo *AirFlowNetwork* tem-se que os ambientes são interligados por meio de fluxos de ar por aberturas (portas, janelas, frestas.), atribuindo-se nós de pressão para cada abertura. Os valores de pressão dos nós externos são conhecidos e, a partir de equações de balanço de massa e de energia, é possível calcular o fluxo de ar que percorre a edificação. Esses nós de pressão são volumes da edificação nos quais se assume que o ar é misturado de forma homogênea e a pressão é estacionária.

Portanto, o modelo de ventilação por rede (*AirflowNetwork*) é escolhido para simulação da ventilação natural neste trabalho, juntamente ao *EnergyPlus*, devido à possibilidade de simulação integrada entre ventilação natural e balanço térmico, possibilitando assim, a análise dos efeitos da direção do vento incidente no perfil de temperatura interna do galpão industrial estudado.

2.4 Período de simulação

Para as simulações numéricas horárias do galpão industrial, são utilizados os dados climáticos do tipo TRY da cidade de Belo Horizonte/MG/Brasil (Zona Bioclimática Brasileira 03 conforme mostra a ABNT NBR 10151 [34]) disponível no site do programa *EnergyPlus* [48]. De acordo com este arquivo climático anual, considerando somente o período de verão (condição atenuante para o aumento do perfil da temperatura interna no interior da edificação analisada), a temperatura máxima de bulbo seco externa para a respectiva cidade foi registrada no dia: 24/set. (34,8°C). Dessa maneira, todas as simulações numéricas são realizadas para tal dia durante as 24 horas assumidas como sendo o funcionamento das atividades laborais neste galpão industrial.

3. Resultados e discussões

3.1 Relação entre a direção vento e a eficiência de vazão no lanternim

Na Figura 3(a) apresenta-se a variação horária da direção predominante do vento incidente sobre a cidade de Belo Horizonte/MG/Brasil, para o dia extremo de verão (24/09) considerado neste trabalho segundo o arquivo climático utilizado [32].

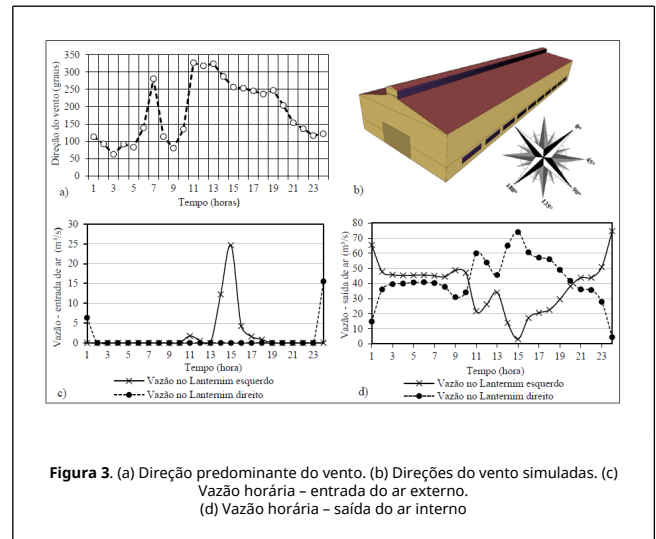


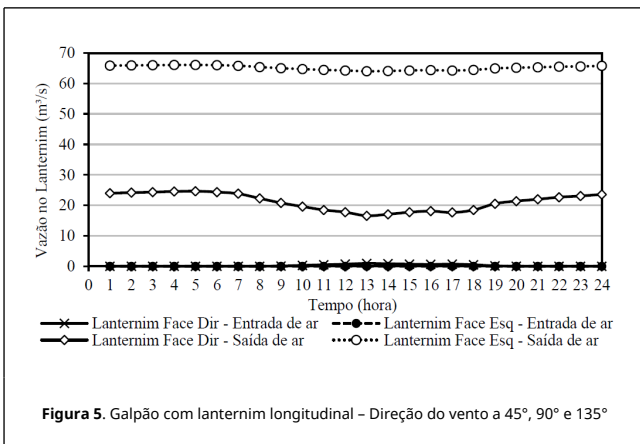
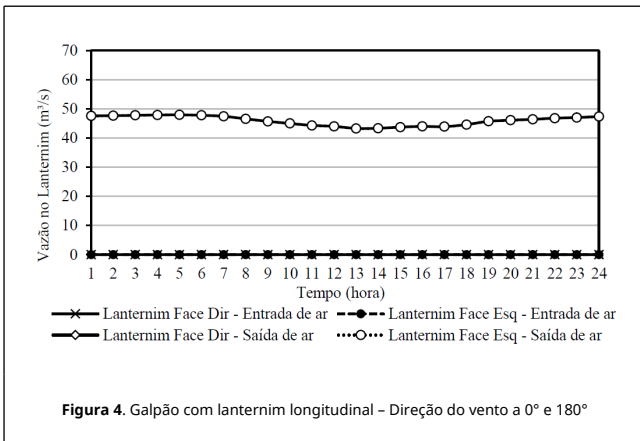
Figura 3. (a) Direção predominante do vento. (b) Direções do vento simuladas. (c) Vazão horária – entrada do ar externo. (d) Vazão horária – saída do ar interno

Tendo em vista, a acentuada mudança da direção predominante do vento ao longo desse dia tipo, plota-se o resultado da evolução horária da vazão de ambas as faces do lanternim longitudinal com 1,50m de altura, conforme mostrado nas Figuras 3(c) e 3(d). Nas simulações é adotado a situação de velocidade constante do vento a 3m/s e analisa-se as seguintes direções do vento: 0°, 45°, 90°, 135° e 180° (Figura 3(b)).

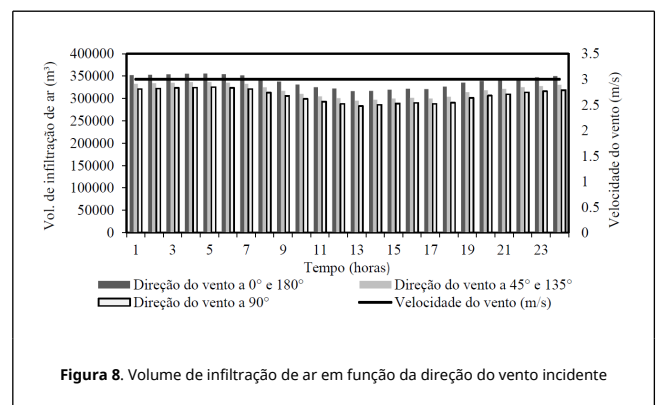
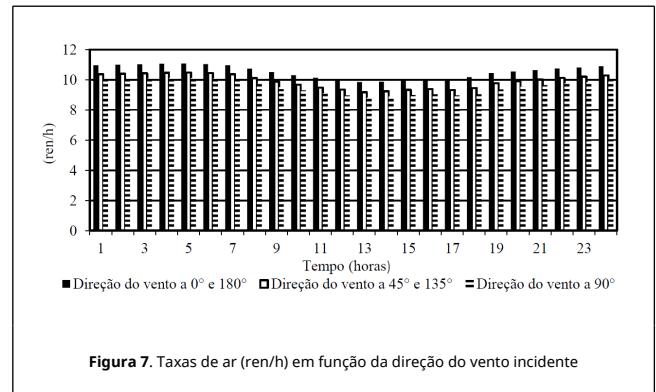
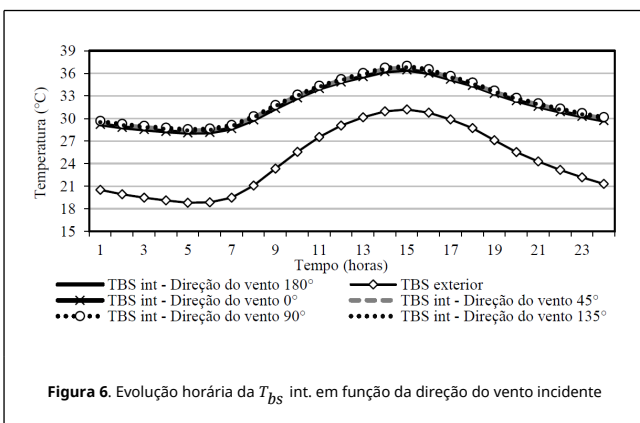
Observa-se pelas curvas mostradas, que a vazão nas faces esquerda e direita do lanternim longitudinal possuem comportamento simétrico (Figura 3(d)), ou seja, quando uma face está com o máximo de eficiência de vazão para a saída do ar interno a outra está atuando, em menores proporções, como porta de entrada para o ar externo; como pode ser observado às 15hs (Figura 3(c)), quando o vento está vindo predominantemente a 250° – prejudicando a exaustão do ar na face esquerda do lanternim. Assim, preconiza-se que a eficiência do lanternim de ventilação é diretamente dependente da direção de incidência dos ventos dominantes, uma vez que, quando o vento predominantemente incide perpendicularmente na face deste, tem-se a tendência de diminuir a eficiência da exaustão natural do ar interior.

Na Figura 4 e na Figura 5 mostra-se a variação horária da vazão nas duas faces do lanternim longitudinal com 1,50m de altura durante o dia típico de verão. O melhor resultado encontrado é para o caso do vento advindo somente das direções 0° e 180°, pois assim, durante as 24 horas do dia, ambas as faces do lanternim atuam somente como fontes de exaustão do ar interno (saída), uma vez que não há correntes de ar atuando perpendicularmente nessas (Figura 4 – com resultados sobrepostos).

Já para o caso do vento advindo somente das direções 45°, 90° e 135° é possível constatar uma considerável perda na eficiência da vazão do ar interno (saída) na face direita do lanternim, lado esse atingido diretamente pelas correntes de ar externo simuladas (Figura 5 – com resultados sobrepostos), ao passo que a face do lado esquerdo do lanternim passa a atuar com sua eficiência máxima de exaustão. Esse último fato tende a amenizar os efeitos finais quanto à função do aparelho em promover uma adequada ventilação natural.



Em relação à diminuição da diferença de temperatura interna do galpão, a direção incidente do vento pouco influi nesse parâmetro, uma vez que considerando o pico de temperatura externa (15hs) tem-se 36,5°C para a melhor situação (vento incidindo a 0° e 180°) enquanto que para a pior situação tem-se 37°C (vento incidindo a 90°) (Figura 6). Situação análoga acontece para os outros dois parâmetros analisados sendo esses, respectivamente, renovação de ar por hora (ren/h) e volume de infiltração de ar (Figuras 7 e 8). Tal resultado vai de acordo com as principais conclusões de Yi *et al.* [21] e Teitel *et al.* [22]. Como esperado, a pior situação encontrada é quando a direção do vento está totalmente incidente à 90° uma vez que em tal situação, frente à face oposta da edificação, tem-se menor incidência das correntes de ar e isso conduz para tal resultado.



Tomando o horário mais crítico deste dia tipo (às 15hs) observa-se uma redução de até 1ren/h nas taxas de renovação do ar interno (Figura 7) e um decréscimo de até 10,7% no volume de ar infiltrado (Figura 8) quando a direção predominante do vento está à 90°.

Logo, é possível inferir que a eficiência da vazão no lanternim de ventilação é sensivelmente afetada em decorrência da direção predominante das correntes de ar externas atuantes sobre este. Os resultados anteriormente mostrados corroboram diretamente para tal afirmação.

3.2 Sobre a inserção de lanternins transversais

Avalia-se também a influência da direção predominante do vento tomando a presença de lanternins transversais (distantes 10m um do outro) presentes ao longo da cobertura do galpão industrial além da presença do lanternim longitudinal de 1,50m de altura já considerado (Figura 9(a)).

Tomando o horário com maior pico de temperatura externa (15hs), nota-se uma sensível redução da temperatura de bulbo seco interna quando comparado ao galpão equipado somente com o lanternim longitudinal de até 1,6°C quando o mesmo está equipado com os lanternins transversais espaçados de 10m um do outro (Figura 9(b)).

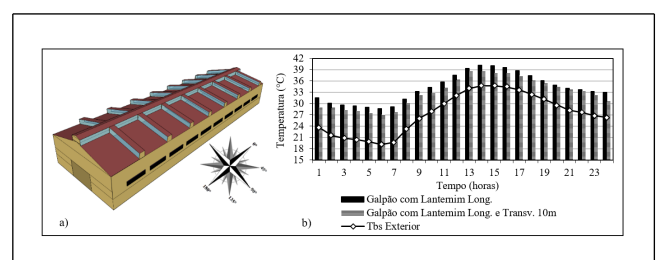
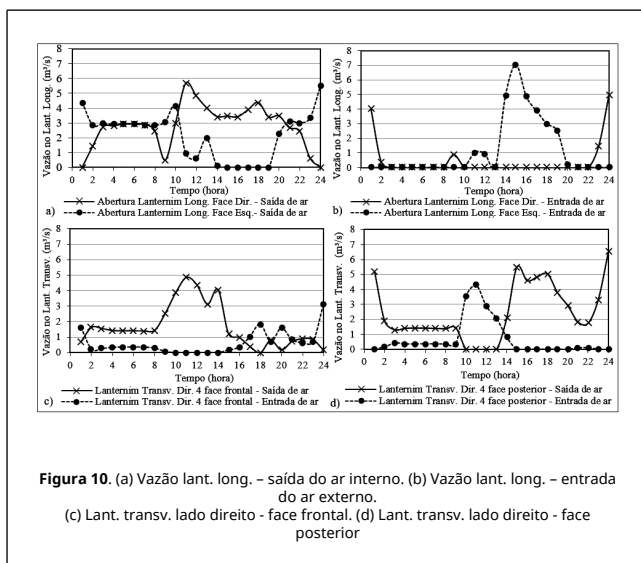


Figura 9. (a) Galpão equipado com lanternins transversais e longitudinais. (b) T_{hs} interna em função da presença dos lanternins transversais

Na [Figura 10\(a\)](#) e na [Figura 10\(b\)](#) têm-se os resultados para a variação da vazão nas faces de uma das aberturas do lanternim longitudinal situado no lado direito do galpão, agora separados pela presença dos lanternins transversais ([Figura 10\(a\)](#)). Percebe-se que a condição de simetria de exaustão do ar interno para ambas as faces do lanternim transversal é perdida, como foi mostrado na [Figura 3\(d\)](#), apesar de ainda ser mantida a condição de eficiência máxima para uma face enquanto a oposta está por vezes funcionando como ponto de entrada para as correntes de ar externas.



Tal situação é vista claramente das 14 às 19hs, quando a face esquerda do lanternim longitudinal passa a ser uma abertura provedora de entrada de ar ao invés de permitir a saída do ar interno ([Figuras 10\(c\)](#) e [10\(d\)](#)). Analogamente ao observado nos lanternins longitudinais, a evolução horária da vazão na face frontal e na face posterior de um dos lanternins transversais do lado direito do galpão, também se mostra ser dependente da direção de incidência do vento para que se tenha maior eficiência em permitir a exaustão natural do ar interno da edificação ([Figuras 10\(c\)](#) e [10\(d\)](#)). Isso acontece devido à posição dos lanternins transversais, uma vez que as aberturas estão posicionadas perpendicularmente ao lanternim longitudinal, tem-se portanto uma maior influência das correntes de ar atuando sobre as faces destes fazendo com que essas aberturas funcionem por mais tempo como pontos para entrada de ar externo que necessariamente atuando como pontos para saída do ar interno.

Esse fato justifica a eficiência insatisfatória do conjunto dos lanternins transversais em contribuir para a diminuição do perfil de temperatura interna do galpão industrial.

4. Conclusões

Em se tratando de uma edificação naturalmente ventilada, é recomendável que se dê devida atenção quanto à disposição das aberturas de ventilação, uma vez que dependendo do arranjo proposto, o vento pode auxiliar ou não na ventilação do ambiente (efeito chaminé). Quando a ação do vento não auxilia a ventilação natural, o fluxo de ar pode ser descendente ao invés de seu comportamento natural de ser ascendente, e assim, intensificar o problema da temperatura interna da

edificação. Dessa forma, o planejamento da ventilação de uma edificação deve aproveitar ao máximo os ventos dominantes do local, especialmente aquelas equipadas com aparelhos provedores de saída de ar interno, como lanternins de ventilação. O objetivo deste artigo é avaliar a influência da direção do vento na vazão do ar interno através dos lanternins, do tipo longitudinal e transversais, presente em galpões industriais dotados de fonte interna de calor de alta intensidade.

Nota-se que a vazão possui comportamento simétrico apenas nas aberturas do lanternim longitudinal, ou seja, quando uma abertura está com a máxima vazão de saída do ar interno, a abertura oposta à direção predominante do vento está atuando como ponto de entrada para o ar externo (em menores proporções). Quanto à presença dos lanternins transversais, ressalta-se a maior sensibilidade destes quanto à direção dos ventos predominantes, em se tratando da eficiência de vazão, posto que estão posicionados perpendicularmente à edificação. À vista disso, o melhor resultado encontrado é para a situação do vento incidindo paralelamente ao galpão (ventos predominantes advindos de 0° e 180°) obtendo-se uma redução na temperatura interna de até 1°C , aumento na taxa de renovação de ar por hora, no ambiente interno, em até 1ren/h , e um acréscimo de cerca de 10% no volume de ar infiltrado. Todos esses resultados são para o horário mais crítico do dia tipo simulado.

Portanto, o conjunto de resultados mostrados neste artigo corroboram com a afirmação de que a eficiência da vazão no lanternim é diretamente dependente da direção predominante do vento, principalmente daqueles posicionados transversalmente ao longo da cobertura da edificação. Em suma, constata-se que a ventilação natural contribui diretamente na melhora do desempenho térmico global do galpão avaliado e tende a colaborar na melhoria das condições de trabalho, bem como no aumento da sensação de bem-estar e na produtividade de todos os envolvidos neste ambiente industrial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES, CNPq e ao PROPEC/UFOP pelos recursos financeiros aplicados ao projeto.

Referências

- [1] Raja I.A., Nicol J.F., McCartner K.J., Humphreys M.A. Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. *Energy and Buildings*, 33(3):235-244, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00087-6)
- [2] Costa E.C. Ventilação. Edgard Blücher, São Paulo, 2005.
- [3] Dear R.J., Brager G.S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings* 34(6):549-561, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1)
- [4] Allard F., Santamouris M. Natural ventilation in building: a design handbook. James & James, London, 1998.
- [5] Açominas. Galpões em estruturas metálicas. Belo Horizonte, 1980.
- [6] Abreu P.G., Abreu V.M.N. Lanternim: função e construção. Embrapa Suínos e Aves, Concórdia, 2000.
- [7] Bower J. Understanding ventilation: How to design, select, and install residential ventilation systems. The Healthy House Institute, 1995.
- [8] Allard F., Santamouris M. Natural ventilation in building: a design handbook. James & James, London, 1998.
- [9] Koenigsberger O.H., Ingersoll T.G., Mayhew A., Szokolay S.V. Manual of tropical housing and building. Longman, New York, 1973.
- [10] Mazon A.A.O., Silva R.G.O., Souza H.A. Ventilação natural em galpões: o uso de lanternins nas coberturas. *Rev. Esc. Minas*, 59(2):179-184, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672006000200007>
- [11] Clezar C.A., Nogueira A.C.R. Ventilação industrial. Editora da UFSC, Florianópolis, 2009.
- [12] Heravi G., Fathi M., Faeghi S. Evaluation of sustainability indicators of industrial buildings focused on petrochemical projects. *Journal of Cleaner and Production*, 109:92-97, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.133>

- [13] Tinôco I.F.F. Avicultura industrial: Novos conceitos de materiais, concepções e técnicas construtivas disponíveis para galpões avícolas brasileiros (Online). *Rev. Bras. Cienc. Avic*, 3(1):1-26, 2001. <https://doi.org/10.1590/S1516-635X2001000100001>
- [14] Gourlis G., Kovacic I. Building information modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(2):953–963, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.009>
- [15] Chang H., Xiang C., Duan C., Wan Z., Liu Y., Zheng Y., Shang Y., Lui M., Shu S. Study on the thermal performance and wind environment in a residential community. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(35):15868–15878, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.039>
- [16] Antonini E.G.A., Romero D.A., Amon C.H. Improving CFD wind farm simulations incorporating wind direction uncertainty. *Renewable Energy*, 133(2):1011–1023, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.084>
- [17] Shi L. Impacts of wind on solar chimney performance in a building. *Energy*, 185:55–67, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.056>
- [18] Tien P.W., Calautit J.K. Numerical analysis of the wind and thermal comfort in courtyards “skycourts” in high rise buildings. *Journal of Building Engineering*, 24:100735, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100735>
- [19] Rahmatmand A., Yaghoubi M., Rad E.G., Tavakol M.M. 3D experimental and numerical analysis of wind flow around domed-roof buildings with open and closed apertures. *Building Simulation*, 7(3):305–319, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12273-013-0157-0>
- [20] Sousa H., Sousa F., Sousa R., Silva L., Sousa G. Thermal performance of light blocks in a Mediterranean climate. *Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing.*, 36(1), 13, 2020. DOI: 10.23967/j.rimni.2020.01.006
- [21] Yi Q., Wang X., Zhang G., Li H., Janke D., Amon T. Assessing effects of wind speed and wind direction on discharge coefficient of sidewall opening in a dairy building model – A numerical study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162:235–245, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.016>
- [22] Teitel M., Ziskind G., Liran O., Dubovsky V., Letan R. Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions. *Biosystems Engineering*, 101(3):351–369, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.09.004>
- [23] Lukiantchuki M.A., Shimomura A.R.P., Silva F.M., Caram R.M. Sheds extratores e captadores de ar: influência da geometria e da dimensão das aberturas no desempenho da ventilação natural nas edificações (Online). *Ambiente Construído*, 16(1):83–104, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000100062>
- [24] Soleimani Z., Calautit J.K., Calautit K., Hughes B.R. Climatic analysis of ventilation and thermal performance of a dome building with roof vent. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 171(8):411–424, 2018. <https://doi.org/10.1680/jensu.16.00018>
- [25] Baeza E.J., Pérez-Parra J.J., Montero J.I. Effect of ventilator size on natural ventilation in parral greenhouse by means of CFD simulations. *Acta Hortic.*, 691:465–472, 2005. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.56>
- [26] Baeza E.J., Pérez-Parra J.J., Lopez J.C., Montero J.I. CFD study of the natural ventilation performance of a parral type greenhouse with different numbers of spans and roof vent configurations. *Acta Hortic.*, 719:333–340, 2006. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.37>
- [27] Baptista F.J., Bailey B.J., Randall J.M., Meneses J.F. Greenhouse ventilation rate: Theory and measurement with tracer gas techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(4):363–374, 1999. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0381>
- [28] Gourlis G., Kovacic I. A study on building performance analysis for energy retrofit of existing industrial facilities. *Applied Energy*, 184:1389–1399, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.104>
- [29] Gourlis G., Kovacic I. Passive measures for preventing summer overheating in industrial buildings under consideration of varying manufacturing process loads. *Energy*, 137:1175–1185, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.134>
- [30] Kandola B.S. Effects of atmospheric wind on flows through natural convection roof vents. *Fire Technol.*, 26:106–120, 1990. <https://doi.org/10.1007/BF01040176>
- [31] Chu C.R., Lan T.W. Effectiveness of ridge vent to wind-driven natural ventilation in monoslope multi-span greenhouses. *Biosystems Engineering*, 186:279–292, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.08.006>
- [32] Boulard T., Draoui B. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(1):27–35, 1995. <https://doi.org/10.1006/jaer.1995.1027>
- [33] Boulard T., Baille A. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(1):37–47, 1995. <https://doi.org/10.1006/jaer.1995.1028>
- [34] ABNT. NBR 15575: Edifícios habitacionais – Desempenho. Parte 1 – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- [35] Bordignon A.L. Equipamentos elétricos industriais – material didático. UFJF, Juiz de Fora, 2014.
- [36] ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.
- [37] ABNT. NBR 15220: 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, 2005.
- [38] UFRGS. Dicionário de materiais do LAFRIG – Arquivo EnergyPlus obtido junto ao Laboratório de Vapor e Refrigeração da faculdade de Engenharia Mecânica da UFRGS (Online), 2007. Available from: <http://www.mecanica.ufrgs.br/lafrig/downloads.htm>
- [39] Scigliano S., Hollo V. IVN - Índice de ventilação natural. Pini, São Paulo, 2001.
- [40] DOE – U.S. Department of Energy. Energy plus simulation software (Online). Building Energy Software Tools Directory, 2018. Available from: <https://energyplus.net/cfm>
- [41] DOE – U.S. Department of Energy. EnergyPlus Version 8.7.0, Documentation: Engineering Reference, 2018.
- [42] Idel'cik I.E. Memento des pertes de charge: Coefficients de pertes de charge singuliers. Eyrolles, França, 1969.
- [43] Machado M.N.Q.B.R. Influência de regimes variáveis de ventilação e aquecimento no comportamento higrótérmico de edifícios de habitação social. PhD Dissertation, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.
- [44] Neves L.O., Roriz M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura (Online). *Ambiente Construído*, 12(1):177–192, 2012. ISSN 1678-8621. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000100012>
- [45] Matos M. Simulação computacional do desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural. PhD dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2007.
- [46] Gomes A.P. Método de avaliação do desempenho térmico de edifícios comerciais e residenciais em light steel framing. PhD Thesis, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- [47] Swami M.V., Chandra S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural ventilation airflow. *Ashrae Transactions*, 94(1):1–27, 1988 apud DOE – U. S. Department of energy [41]. Building energy software tools directory. 2018. [Online]. Available from: http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/alpha_list.cfm
- [48] Weather Data by Region, EnergyPlus, 2018. [Online]. Available from: https://energyplus.net/weather-region/south_america_wmo_region_3/BRA%20%20