

MEDIDAS ATENUANTES À EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL ACIMA DO LIMITE DE IBUTG EM GALPÕES INDUSTRIAIS

ATTENUATING MEASURES FOR OCCUPATIONAL EXPOSURE ABOVE THE WBGT LIMIT IN INDUSTRIAL BUILDINGS

 Bruno Henrique Lourenço Camargos¹

 Henor Artur de Souza²

 Raquel Diniz Oliveira³

 Adriano Pinto Gomes⁴

 Luma de Souza Dias⁵

 Thalita Cardoso Dias⁶

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, brunolourencocamargos@gmail.com

² Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, henorster@gmail.com

³ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, raqueldiniz@cefetmg.br

⁴ Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Preto, MG, Brasil, adriano.gomes@ifmg.edu.br

⁵ Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, lumadias_mtpo@hotmail.com

⁶ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, thalitaacdias@gmail.com

Contribuição dos autores:

BHLC: conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, programas, supervisão, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **HAS:** conceituação, análise forma, investigação, metodologia, administração de projeto, supervisão, validação, visualização, escrita - revisão e edição. **RDO:** análise formal, investigação, metodologia, administração de projeto, validação, visualização, escrita - revisão e edição. **APG:** conceituação, curadoria dos dados, análise formal, metodologia, supervisão, validação, visualização, escrita - revisão e edição. **LSD:** conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, programas, supervisão, validação, visualização, escrita - revisão e edição. **TCD:** conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, programas, supervisão, validação, visualização, escrita - revisão e edição.

Fomento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais

Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editor Responsável: Michele Marta Rossi 

Resumo

As avaliações ocupacionais em ambientes laborais se mostram relevantes para a saúde, bem-estar e produtividade dos operários. Neste trabalho, analisa-se por meio de modelagem numérica no EnergyPlus, as condições de exposição ao calor em galpões industriais com fonte interna liberadora de calor para Belo Horizonte/MG, equipados ou não com lanternim (12 modelos: variando-se áreas das aberturas, potência da fonte interna e altura desse dispositivo), a fim de averiguar a conformidade das condições térmicas internas em relação ao limite do Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo (IBUTG) previsto na NR-15/2021. Os resultados realçaram a relevância do lanternim e dos aparatos de proteção das aberturas na vazão de ar em relação ao aumento das horas em conformidade com o limite de IBUTG. Além disso, constata-se que a fonte interna de calor intensifica o efeito chaminé culminando, portanto, no auxílio da vazão natural do ar interno através do lanternim. Deste modo, obtém-se uma diminuição da temperatura interna em até 5,1°C. Com a correção da altura do lanternim, reduz-se até 3,3°C de IBUTG, resultando, neste caso no valor máximo de 28,5°C para o dia extremo do verão belo-horizontino em apenas 36% das horas do ano acima do IBUTG recomendado. Ressalta-se, como principal contribuição, que se tratando de galpões com fonte de calor, quanto maior a área de saída do ar melhor é a condição térmica interna. Em conclusão, casos semelhantes podem aproveitar as estratégias recomendadas neste estudo para projetar novos galpões ou tomar decisões de intervenção em edifícios existentes.

Palavras-chave: ventilação natural, avaliação de espaços com fonte de calor, ambiente de trabalho industrial.

Abstract

Occupational assessments are essential in ensuring employees' wellness, health, and productivity in industrial buildings. This study aims to evaluate the effects of heat exposure in industrial buildings equipped with internal heating sources in Belo Horizonte, Brazil. Using EnergyPlus numerical modeling, the analysis encompasses buildings with and without ridge vents, resulting in 12 distinct models with varying opening areas, internal source power and ridge vent heights. As a primary objective, compliance with the Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) index limit, as specified by NR-15/2021, was determined for indoor thermal conditions. As a result, roof ridge vents and shading devices significantly impact airflow, particularly regarding the increase in work hours that fulfil the WBGT limit. Additionally, the results revealed an enhancement of the chimney effect by internal heat, which led to a temperature reduction of up to 5.1°C through the ridge vent. Thus, by adjusting the ridge vent height, the WBGT can be further reduced by up to 3.3°C. Therefore, even during the hottest summer days in Belo Horizonte (Brazil), the maximum temperature remains at 28.5°C, with 36% of all annual hours exceeding the WBGT limit. As a key finding, a larger area of air outlets in industrial buildings equipped with internal heat sources increases indoor thermal comfort. In summary, similar cases can benefit from these strategies when designing new industrial facilities or retrofitting existing buildings.

Keywords: natural ventilation, heat source spaces evaluation, industrial workplace.

How to cite this article:

CAMARGOS, B. H. L.; SOUZA, H. A. de; OLIVEIRA, R. D.; GOMES, A. P.; DIAS, L. de S.; DIAS, T. C. Medidas atenuantes à exposição ocupacional acima do limite de IBUTG em galpões industriais. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 15, p. e024002, 2024. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v15i00.8672111>

Submitted 24.01.2023 – Approved 20.10.2023 – Published 18.01.2024

e024002-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 15, p. e024002, 2024, ISSN 1980-6809



Introdução

Ambientes laborais que apresentam condições inóspitas, como excesso de calor ou umidade, colocam o corpo humano em situação de estresse, o que pode levar a um ganho ou perda de calor para manter o equilíbrio térmico. Nessas condições de desconforto, é comum observar uma redução na produtividade dos trabalhadores, aumento das sensações de mal-estar e possível desenvolvimento de problemas de saúde (Zhang *et al.*, 2021).

Com o intuito de melhorar as condições térmicas dos ambientes de trabalho, em alguns casos, torna-se inevitável a implementação de equipamentos condicionadores e/ou umidificadores de ar, especialmente, em locais equipados com fontes internas de calor, como em galpões industriais. Uma das alternativas frente à implementação de sistemas mecânicos de condicionamento do ambiente consistiria em propiciar condições internas favoráveis à ventilação natural. Essa opção se mostra fundamental à promoção do equilíbrio térmico, uma vez que aumenta a intensidade dos processos físicos por meio dos quais o homem transfere seu excesso de calor para o meio que o circunda e melhora a qualidade do ar, além de diminuir a temperatura no interior das edificações. Se tratando dos galpões industriais, sobretudo naqueles equipados com fontes internas de calor, é comum a construção de aberturas nas coberturas, denominadas lanternins, além das aberturas nas fachadas, que visam garantir a iluminação natural bem como contribuir para que se tenha uma ventilação natural eficiente (Mazon; Silva; Souza, 2006; Gourlis; Kovacic, 2017; Bach *et al.*, 2023).

Ambientes termicamente desconfortáveis, principalmente aqueles com temperaturas elevadas, podem aumentar significativamente o risco de acidentes no trabalho, já que a sensação de desconforto é atenuada pelo aumento da frequência cardíaca e da circulação sanguínea, podendo gerar sintomas como enjoos, náuseas ou até desmaios nos trabalhadores. Isso pode levar à suspensão temporária do trabalho e/ou à queda da produtividade na empresa (Scigliano; Hollo, 2001; Heravi; Fathi; Faeghi, 2015; Camargos *et al.*, 2021).

Nos galpões industriais brasileiros há pouco ou nenhum planejamento arquitetônico para o condicionamento térmico natural, resultando em temperaturas elevadas que proporcionam condições ambientais acima do limite recomendado para os ocupantes deste tipo de espaço (Tinôco, 2001; Mazon; Silva; Souza, 2006; Geraldi *et al.*, 2022).

Objetivos

Avaliar a influência da ventilação natural em galpões industriais com fonte interna de calor, por meio da parametrização das aberturas de entrada e saída de ar (lanternim) e outras variações de construção visando-se melhorar as condições de exposição ocupacional. Para tanto, faz-se uma comparação dos resultados de IBUTG com as recomendações da NR-15 (Brasil, 2021).

Fundamentação

Em linhas gerais, ventilar consiste em trocar o ar de um recinto fechado seja por meios naturais, quando recebe o nome de ventilação natural, ou de forma induzida por equipamentos mecânicos, chamada ventilação forçada. O propósito de uma adequada ventilação nas edificações seria a manutenção de um ambiente interno saudável e mais confortável com a intenção de preservar a qualidade do ar interno (Tian *et al.* 2020; Zhang *et al.* 2021).

O ar se desloca naturalmente através de aberturas, como janelas, exaustores e lanternins, que devem ser posicionados de maneira adequada para garantir um fluxo de ar apropriado no ambiente. Por isso, a ventilação natural em galpões industriais tem como objetivo controlar a temperatura, distribuição do ar e umidade, bem como eliminar poluentes do ambiente, tais como gases, vapores, poeiras, fumos, névoa, microrganismos e odores (Lacchini, 2010; Wang *et al.* 2021).

Os benefícios da ventilação natural no que tange às condições de exposição ambiental dos ocupantes das edificações vêm sendo estudados ao longo de várias décadas. Dentre vários trabalhos, ressaltam-se algumas obras que agregam informações técnicas a este, tal como está demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Artigos revisados por citação que abordam: influência do vento na eficiência da vazão através das aberturas e influência do lanternim

Autores (ano)	Período de estudo	Tipo de edificação	Objetivo	Método	Principal contribuição
Baeza, Pérez-Parra, Lopez e Montero (2006)	-	Industrial/comercial	Investigar a influência da dimensão da edificação (número de vãos) na eficiência da ventilação natural	Simulações em CFD para estudar o efeito do número de vãos em um galpão tipo parral (2, 3, 5, 7, 10 e 15 vãos)	Para aproveitar ao máximo a ventilação impulsionada pelo vento, as aberturas de saída de ar devem estar voltadas diretamente para a direção predominante do vento.
Iffa e Tariku (2015)	Verão e inverno	Industrial/comercial	Investigar os efeitos da variação do espaço e as localizações da área de ventilação para estudar seu efeito na distribuição de ar e no perfil de temperatura dentro do espaço.	Simulações em CFD e validação do modelo por meio de medições in loco	Ao contrário de edifícios com fontes internas de calor, a efetividade da ventilação natural no interior do ambiente se dá somente pela atuação do vento. Quando a abertura de saída de ar é posicionada longe do topo da cobertura, a velocidade do ar que entra aumenta, mas a distribuição do ar não será uniforme
Van Overbeke <i>et al.</i> (2016)	Verão	Industrial	Validar o método de medição aplicando o princípio da conservação da massa de ar, ou seja, as taxas de entrada devem ser iguais às taxas de saída.	Medições in loco e CFD. No topo do telhado, foram instalados 7 anemômetros ultrassônicos 2D estáticos.	Para todas as direções avaliadas, o lanternim é um ponto de saída constante do ar interno, enquanto as aberturas laterais variam de acordo com a incidência do vento
Chu e Lan (2019)	-	Industrial/comercial	Avaliar a eficiência da renovação do ar interno de estufas com lanternins por meio de simulação numérica e experimentos em túnel de vento.	Simulações em CFD com validação em túnel de vento por meio de 6 modelos com diferentes posições para as aberturas e vento predominante a 0° e 180°	A ventilação da cumeeira de barlavento (diretamente voltada para a direção do vento quando $\theta = 180^\circ$) pode aumentar a taxa de ventilação em comparação com a ventilação da cumeeira de sotavento, quando a direção do vento é $\theta = 0^\circ$.
Fedyushkin (2020)	-	Industrial	Avaliar modelos de lanternins quanto a eficiência, em termos de resistência aerodinâmica	CFD, com validação dos resultados por modelo experimental reduzido	Melhores resultados: apresentam simetria longitudinal quando direcionados para o norte da edificação
Camargos <i>et al.</i> (2021)	Dia extremo de verão	Industrial	Avaliar a influência da direção do vento na vazão através do lanternim em galpões	Simulação no EnergyPlus. Direções do vento: 0°, 45°, 90°, 135° e 180°	Quando vento incide paralelamente tem-se os melhores resultados: redução de até 1°C e aumento de 1ren/h e até 10,7% no volume de ar
Chen, Lin, Chung e La, 2022	-	Industrial	Avaliar a influência dos parâmetros de construção do lanternim	CFD com validação dos resultados por modelo experimental reduzido	Parâmetros dominantes: altura, largura e comprimento do beiral para ventilação induzida pelo efeito chaminé

Fonte: os autores.

Ventilação devido a diferença de densidade com o emprego de lanternins

Nas edificações, o deslocamento do ar pode estar associado a inúmeros fatores e sujeito às leis da física, uma vez que, para que haja a movimentação num dado ambiente, necessariamente, deverá haver diferença de pressão bem como um caminho livre para tal. Esse caminho está compreendido entre as aberturas, já a diferença de pressão pode ocorrer devido à ação dos ventos ou pela diferença de densidade do ar que sucede do

efeito chaminé (Bower, 1995; Allard, 1998; Izadyar, Miller, Rismanchi e Garcia-Hansen 2020).

Em relação ao efeito chaminé, sabe-se que o ar, quando aquecido, mantém sua massa e aumenta seu volume, tornando-se menos denso. Partindo dessa hipótese, em ambientes fechados, o ar interno se deslocará naturalmente para as partes mais altas da edificação e tenderá a sair para o exterior se houver passagens na cobertura, como lanternins, por exemplo. Por outro lado, o ar externo, mais denso, entrará na edificação através das aberturas próximas à base do recinto, ocupando o lugar do ar quente que saiu. Esse efeito ocorrerá sempre que houver um pequeno diferencial de temperatura no ambiente interno (Macintyre, 1990; Costa, 2005; Mazon; Silva; Souza, 2006; Clezar; Nogueira, 2009).

Wang *et al.* (2021) comprovam a interação significativa entre o vento e a flutuabilidade gerada pela fonte de calor presente na edificação e que os poluentes migram para a abertura no lanternim a depender da direção do vento atuante (se lado esquerdo ou direito). Sob essa mesma perspectiva, Pu *et al.* (2022) avaliaram a influência da ventilação natural impulsionada pela flutuabilidade térmica em um corredor industrial, comum em caldeirarias e fornos. Os autores concluíram que a altura da base da fonte de calor apresentou um efeito considerável no ambiente térmico interno. Devido à intensificação do efeito chaminé, as taxas de renovação do ar interno também aumentam. Assim, o fluxo de ar no corredor principal se transforma em um canal de calor simétrico, e a temperatura nessa região diminui rapidamente.

Cálculo das áreas das aberturas de entrada e saída de ar

Clezar e Nogueira (2009) recomendam que, para obter a vazão e as áreas das aberturas, deve-se considerar conhecidos a "intensidade e a direção do vento, a temperatura e a pressão externa do ar, e, conseqüentemente, sua massa específica, os coeficientes de pressão, as áreas e as cotas de cada abertura". Segundo os mesmos autores, também é necessário conhecer a "temperatura média do ar ou a carga térmica sensível do ambiente". Portanto, para aplicar a Equação (1), Mazon, Silva e Souza (2006) ressaltam que é necessário assumir a "condição de regime permanente, perda de carga desprezível no escoamento interno e conservação de massa e quantidade de movimento". Desse modo, a Equação (1) é aplicável para qualquer número de aberturas desejado.

$$A_k = \frac{2Q_e \rho_e \lambda_k}{\sum_{j=1}^n K_j \lambda_j \sqrt{2\rho_{ar} |\Delta P_j|}} \quad (1)$$

Em que A_k é a área individual de cada abertura (em m^2), Q_e é a vazão de entrada (em m^3/s), ρ_e é a massa específica do ar exterior (em kg/m^3), λ_k é a fração de área da abertura requerida em relação a área total das aberturas (adimensional), K_j é o coeficiente de vazão de cada área (adimensional), ρ_{ar} é a massa específica do ar (em kg/m^3) e ΔP_j é a diferença de pressão do ar na abertura j (em Pa).

Camargos *et al.* (2022) adotam no dimensionamento das aberturas de entrada e saída de ar a presença de aparatos de entrada de luz e proteção, do tipo venezianas industriais. Isto posto, segundo Idel'cik (1969) *apud* Clezar e Nogueira (2009), para ambas as aberturas, o coeficiente de vazão de cada área K_j é igual a 0,40.

Ainda de acordo com Clezar e Nogueira (2009) "é recomendável que o total de área de entrada de ar seja aproximadamente o dobro do total de área de saída de ar", uma vez

que, de acordo com os autores, nessas condições a vazão é aumentada em torno de 25% em relação ao valor obtido em casos em que as áreas são iguais.

Índice de ventilação natural

Scigliano e Hollo (2001) desenvolveram empiricamente o Índice de Ventilação Natural (IVN) como forma de representar o grau de eficiência da ventilação natural em edificações. De acordo com Mazon, Silva e Souza (2006), o IVN é calculado como a razão entre a área total das aberturas disponíveis para a saída de ar aquecido e a área do piso interno da edificação, levando em consideração os fatores redutores de área de abertura, que podem estar associados ao atrito ou à mudança de direção. A Equação (2) é usada para calcular o IVN.

$$IVN = \frac{A_a}{A_p} R_{aa} R_{da} R_{md} 100 \quad (2)$$

Em que A_a é a área total das aberturas disponíveis para passagem de ar depois da instalação dos aparatos utilizados para permitir a entrada de luz e proteção contra chuva (em m^2), A_p é a área do piso interno da edificação (em m^2), R_{aa} é o redutor de área de abertura da passagem de ar (adimensional), R_{da} é o redutor devido ao atrito e a presença de tela protetora (adimensional) e vale 0,76 para o caso com distância entre aletas das venezianas industriais de 9,0 a 15,9cm; R_{md} é o redutor de mudança de direção (adimensional) e vale 0,30 para lanternins com venezianas industriais (Scigliano; Hollo, 2001; Mazon; Silva; Souza, 2006).

Avaliação da exposição ocupacional a altas temperaturas

Para a avaliação das condições de trabalho nos ambientes sujeitos a altas temperaturas utiliza-se como padrão técnico legal o IBUTG estabelecido pela NR-15 (Brasil, 2021) dado pela Equação (3). Segundo o anexo 03 da NR-15 (Brasil, 2021) “considerando que os trabalhadores desenvolvam atividade do tipo moderada e adotando um regime de trabalho intermitente com descanso no próprio local de trabalho (por hora)”, além de objetivar-se que haja a execução do trabalho continuamente durante o dia, tem-se o valor máximo de IBUTG igual a 26,7°C.

$$IBUTG = 0,7T_{bu} + 0,3T_g \quad (3)$$

Em que IBUTG é o índice de bulbo úmido termômetro de globo que simula a pele do trabalhador molhada pelo suor (em °C); T_{bu} é a temperatura de bulbo úmido natural (em °C) e T_g é a temperatura de globo (em °C).

Para obter T_{bu} , é necessário reduzir iterativamente a temperatura de bulbo seco (T_{bs}) enquanto se mantém constante a entalpia, até que a umidade relativa (UR%) esteja próxima a 100%, segundo Camargos *et al.* (2022). De acordo com Incropera, Dewitt, Bergman e Lavine (2008) T_g é a temperatura mínima que pode ser alcançada apenas pela evaporação da água, e essa medida de temperatura reflete as propriedades físicas de um sistema constituído pela evaporação da água no ar. Camargos *et al.* (2022) destacam que a obtenção de T_g requer o uso da temperatura radiante média (T_{rm}) obtida por meio da Equação (4). T_{rm} é a temperatura de uma região circundante que é considerada para eliminar o efeito da reflexão, na qual um corpo troca a mesma quantidade de energia que o ambiente em questão. Para a Equação (4), é assumido que o globo possui um diâmetro de 0,15m e que a emissividade do globo é de $\epsilon = 0,95$.

$$T_{rm} = \sqrt[4]{(T_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot \epsilon^{0,6} \cdot (T_g - T_{bs})} - 273 \quad (4)$$

Em que T_{rm} é a temperatura radiante média (em °C); v é a velocidade do ar (em m/s); T_g é a temperatura de globo (em °C) e T_{bs} é a temperatura de bulbo seco (em °C).

Sob essa temática, ressaltam-se os trabalhos descritos na sequência. Wang *et al.* (2016) investigaram o ambiente térmico e a percepção dos trabalhadores de um galpão industrial com fontes de calor em diferentes locais durante o verão e o inverno. O IBUTG médio variou entre 27,3°C e 29,0°C no verão e entre 5,7°C e 8,9°C no inverno, o que correspondeu às percepções dos trabalhadores desse ambiente. Kakaei *et al.* (2019) realizaram um estudo sistemático e de meta-análise para estimar o IBUTG de diversos tipos de indústrias. Os resultados mostraram que esse valor médio foi de 29,4°C para homens e 24,3°C para mulheres, indicando um aumento ao longo do tempo. Sugere-se que esse aumento pode ser devido ao aquecimento global ou à falta de condições adequadas de trabalho. Teimori *et al.* (2020) avaliaram em 12 minas de materiais de construção a eficiência do IBUTG, obtido por meio da simulação numérica, quando aplicada para mensurar os parâmetros fisiológicos dos trabalhadores (175 homens). Os resultados permitiram observar que esse IBUTG tem uma correlação muito alta com o IBUTG medido e aprovado pela ISO 7243 (2017).

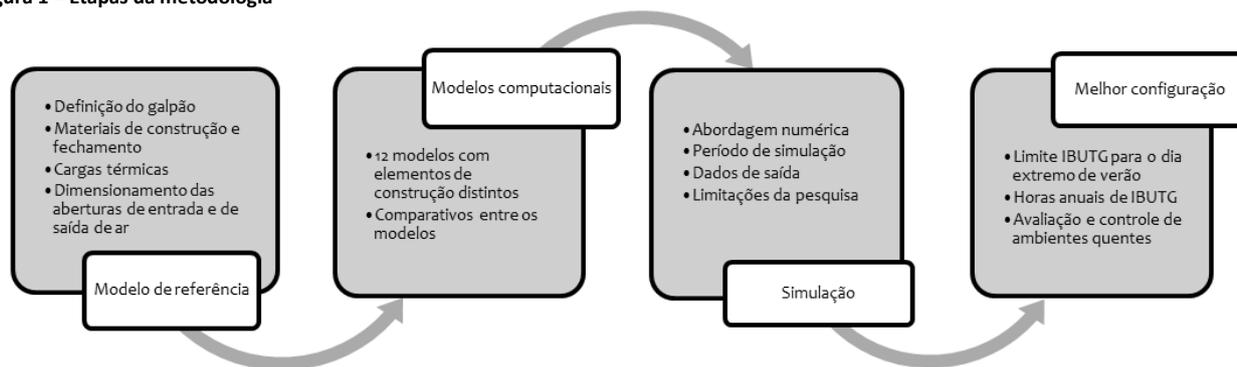
Amorim *et al.* (2020) avaliaram o IBUTG juntamente a algumas outras taxas metabólicas referentes as funções desempenhadas por 64 trabalhadores expostos ao calor externo. Nessa situação, os autores concluíram que se faz necessária a adoção de medidas de controle já listadas na NR-15 (Brasil, 2021) tal como pausas para descanso a fim de resfriar o corpo e evitar o aparecimento de doenças oriundas de estresse térmico. Nesse contexto, Meng, Xiong, Yang e Cao (2021) propuseram um método dinâmico para prever o IBUTG interno considerando os efeitos de radiação e resultados mais precisos foram obtidos ao serem validados com medições *in loco*. A T_{bs} interna variou de 24,6 °C a 37,9 °C, com uma média de 30,6 °C. O IBUTG interno variou de 25,2°C a 32,2°C, com média de 29,1 °C. Portanto, de acordo com a norma ISO 7243 (ISO, 2017), os trabalhadores foram expostos à condições de superaquecimento que os colocaram em maior risco de doenças relacionadas ao calor por 63% das horas de trabalho.

Meng, Xiong, Yan e Cao (2022) estudaram os efeitos do IBUTG nos índices fisiológicos e na percepção térmica subjetiva. Conforme os resultados, a temperatura média da pele, a temperatura oral e a frequência cardíaca dos trabalhadores aumentam com o IBUTG, enquanto a pressão arterial diminui. Por fim, Bach *et al.* (2023) simularam o ambiente térmico interno de uma indústria de tamanho médio, naturalmente ventilada em um clima quente e úmido, com quatro configurações distintas na cobertura e observaram uma redução na T_{bs} interna de 2°C. Além disso, houve uma redução nas horas anuais de trabalho em que IBUTG excede os limites padronizados para taxas de trabalho moderadas em até 603 horas, o equivalente a 75 dias de trabalho por ano.

Materiais e métodos

Tendo em vista a obtenção de IBUTG para avaliar as condições de exposição ocupacional em uma tipologia de galpão industrial, realizam-se variações paramétricas em um modelo computacional de referência utilizando o programa *EnergyPlus* (8.7.0) a fim de identificar a melhor configuração de construção. Para isso, segue-se a metodologia proposta por Camargos *et al.* (2021), tal como é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Etapas da metodologia

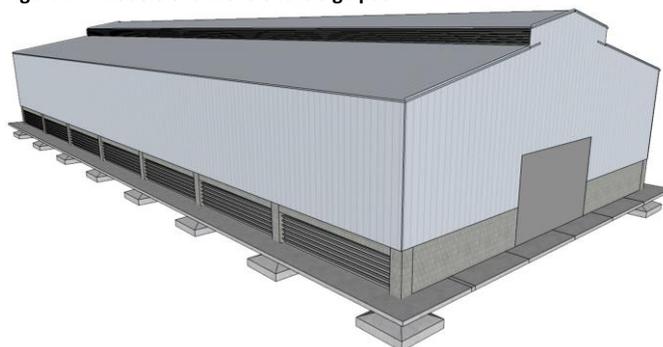


Fonte: os autores.

Definição do galpão

Em virtude da facilidade de acesso à informação e aos materiais necessários para o desenvolvimento da presente pesquisa seleciona-se como objeto de estudo o galpão industrial analisado por Camargos *et al.* (2021). Tal edificação possui 3.000m² de área construída (médio porte) além de apresentar forma prismática retangular tendo por fechamento superior uma cobertura com planos inclinados e um lanternim longitudinal no trecho da cumeeira, como é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Modelo tridimensional do galpão



Fonte: Camargos (2019).

Na Tabela 1 mostra-se as dimensões do galpão em relação à base da edificação.

Tabela 1 – Dimensões do galpão

Fechamento em alvenaria (m)	Altura do volume		Volume de ar (m ³)
	Fechamento metálico (m)	Trecho da cumeeira (m)	
3	6	13,50	Aprox. 33.000

Fonte: Camargos (2019).

Materiais de construção e fechamentos

Trata-se de um galpão situado em Belo Horizonte/MG, Brasil, que é uma cidade pertencente a zona bioclimática 3, latitude 19,93S, longitude 43,93W e altitude de 850m. Na Tabela 2 estão demonstrados os materiais de construção utilizados na caracterização da envoltória do galpão estudado. Ressalta-se que a escolha desses se dá a partir dos materiais comumente encontrados no contexto belo-horizontino.

Tabela 2 – Propriedades térmicas e físicas dos materiais de construção

Material	Absortância solar (α_s)	Espessura (cm)	Condutividade κ (W/m.K)	Densidade ρ (kg/m ³)	Calor específico c(J/kg.K)
Parede de alvenaria (até 3 metros de altura)					
Bloco de concreto furado	0,60	20,0	0,57	1040,0	830,0
Argamassa de reboco	0,50	2,0	0,72	1860,0	830,0
Piso					
Concreto	0,70	10,0	1,75	2400,0	1000,0
Cobertura, fechamento lateral, superior e lanternim					
Chapa em aço galvanizada	0,25	0,20	55,0	7800,0	460,0

Fonte: Adaptado pelos autores de NBR 15220-2 (ABNT, 2005) e Camargos (2019).

Cargas térmicas

De acordo com a norma ISO 8996 (ISO, 2004) ao realizar-se atividades do tipo moderada, referente ao exercício com máquina ou bancada, admitindo-se alguma movimentação, gera-se uma atividade metabólica (MET) de até 175W por pessoa (Lacchini, 2010; Camargos et al., 2021; LBNL, 2022). Por ser comum o uso de uniformes nos ambientes laborais, considera-se como vestimentas típicas tanto para o verão quanto para o inverno, roupas com uma resistência térmica média de 1clo ou 0,155m²C/W, tal como recomenda a norma ISO 7730 (ISO, 2005). Quanto às cargas térmicas internas assumidas neste trabalho (Tabela 3), segundo Neufert (2006), “num ambiente industrial que desenvolva atividades para a produção e/ou a transformação de peças tem-se uma ocupação média de uma pessoa para cada 70m²”. Portanto, tomando a área do galpão, tem-se uma ocupação média de até 45 trabalhadores. Além disso, propõe-se como cotidiano industrial um funcionamento de 24 horas por dia. De acordo com Bordignon (2014), cada indústria tem sua cultura particular em se tratando de cargas elétricas da unidade, potências nominais e entre os vários níveis de tensão de utilização. Porém, em relação a uma indústria de médio porte, adotando a tensão média de subestação de uma unidade de processo, tem-se que essas alimentam motores com potências superiores até a 1,5MW. À vista disso, é assumido nas simulações a presença de uma fonte de calor com potência nominal de 1MW situada no interior do galpão industrial (Tabela 3). De acordo com Lacchini (2010), é necessário um nível de iluminação artificial de 300 a 750lux para o desempenho de tarefas moderadamente críticas e prolongadas, com detalhes médios. Assim, conforme Macintyre (1990), adotando um nível de iluminação de 500lux para o galpão, é dissipada uma potência de até 30W/m² para o ambiente. Logo, Camargos et al. (2021) calcularam o calor liberado pela iluminação artificial igual a 89.938,8W (Tabela 3).

Tabela 3 - Cargas térmicas do galpão industrial

Fonte interna de calor (W)	Iluminação (W)	Funcionários (W)
1.000.000,0	89.939,8	7.875,0

Fonte: Camargos (2019).

Dimensionamento das aberturas de entrada e saída de ar

O critério de dimensionamento proposto por Clezar e Nogueira (2009) é utilizado para a obtenção das áreas das aberturas de entrada e saída de ar do galpão industrial. Para determinar a vazão necessária de ventilação natural em função da carga térmica interna assumida, é elaborado um algoritmo solucionado com auxílio do programa Microsoft Visual Studio (versão 2010), baseado na linguagem Fortran (.HTML ou .CSV). A Equação (1) é utilizada para obter a área individual de cada abertura de entrada de ar. Já a altura do lanternim é determinada a partir da relação entre a área de saída de ar (A_k) dada pela Equação (1) e a área total das aberturas de ar (A_a) dada pela Equação (2). Os resultados

de tais aplicações estão demonstrados na Tabela 4 e caracterizam o modelo de referência do galpão, onde lê-se: área de entrada de ar (A_e), área de saída de ar (A_s), altura do lanternim (A_l) e potência da fonte interna (P).

Tabela 4 – Áreas das aberturas de entrada e saída de ar

Denominação	Vazão (m ³ /s)	Área de entrada de ar (m ²)	Área de saída de ar (m ²)	Altura do lanternim (m)	Fonte interna
Galpão - Modelo de referência	122,13	$A_e = 85,40$	$A_s = 42,69$	$A_l = 0,50$	$P = 1\text{MW}$

Fonte: os autores.

Para identificar as melhores estratégias que proporcionam condições térmicas e de qualidade do ar em galpões industriais e obter-se os valores anuais de IBUTG para comparação com os limites da NR-15, é fundamental ter um modelo de referência como ponto de partida para a realização de simulações paramétricas. Tal configuração, nomeada modelo A (Tabela 5), é definida com base nas dimensões e características de construção do galpão (Tabela 1), nos materiais utilizados em sua construção (Tabela 2), na carga térmica assumida (Tabela 3) e nas áreas das aberturas de entrada e saída de ar (Tabela 4).

Tabela 5 – Modelos analisados

Modelo	Denominação	Definição	Área de entrada de ar (m ²)	Área de saída de ar (m ²)	Altura do lanternim (m)	Fonte interna
A	Modelo de referência	Tabelas 1 a 3	$A_e = 85,40$	$A_s = 42,69$	$A_l = 0,50$	$P = 1\text{MW}$
B	Galpão sem lanternim	Idem Modelo A	$A_e = 85,40$	$A_s = 42,69$	$n/a^{1)}$	$P = 1\text{MW}$
C	Galpão sem fonte interna	Idem Modelo A	$A_e = 85,40$	$A_s = 42,69$	$A_l = 0,50$	$n/a^{1)}$
D.1	Variação da potência das fontes internas	Idem Modelo A	$A_e = 85,40$	$A_s = 42,69$	$A_l = 0,50$	$\frac{1}{4} P = 0,25\text{MW}$
D.2		Idem Modelo A	$A_e = 85,40$	$A_s = 42,69$	$A_l = 0,50$	$\frac{1}{2} P = 0,50\text{MW}$
D.3		Idem Modelo A	$A_e = 85,40$	$A_s = 42,69$	$A_l = 0,50$	$2P = 2\text{MW}$
D.4		Idem Modelo A	$A_e = 85,40$	$A_s = 42,69$	$A_l = 0,50$	$5P = 5\text{MW}$
E.1	Parametrização das áreas das aberturas de entrada e saída do galpão	Idem Modelo A	$\frac{1}{2} A_e = 42,70$	$A_s = 42,69$	$A_l = 0,50$	$P = 1\text{MW}$
E.2		Idem Modelo A	$2A_e = 170,80$	$A_s = 42,69$	$A_l = 0,50$	$P = 1\text{MW}$
E.3		Idem Modelo A	$A_e = 85,40$	$\frac{1}{2} A_s = 21,34$	$\frac{1}{2} A_l = 0,25$	$P = 1\text{MW}$
E.4		Idem Modelo A	$A_e = 85,40$	$2A_s = 85,38$	$2A_l = 1,00$	$P = 1\text{MW}$
F	Galpão com a altura do lanternim corrigida	Idem Modelo A	$A_e = 85,40$	$A_s = 150$	$A_l^{2)} = 1,50$	$P = 1\text{MW}$

Notas: 1) A configuração não é aplicável a este modelo. 2) No modelo F, a altura do lanternim é corrigida utilizando-se a Equação (2) por meio da consideração dos coeficientes redutores de área de abertura devido à presença dos aparatos de proteção. Fonte: os autores.

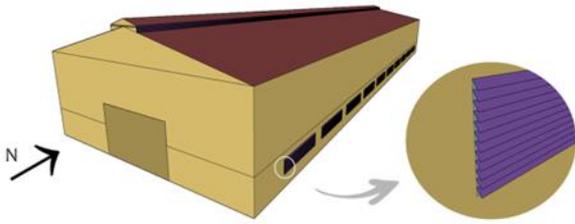
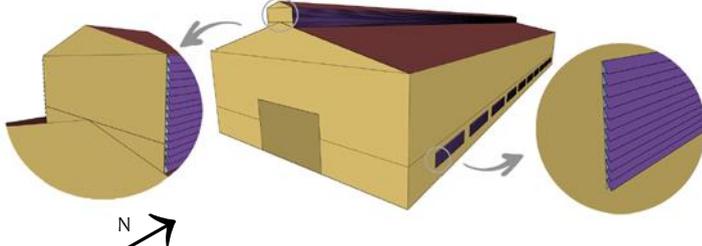
Modelos computacionais

A descrição dos 12 modelos de galpões estudados é apresentada na Tabela 5. Para representar graficamente os modelos computacionais, utiliza-se o *plug-in* Euclid (versão 0.9.4.4), que permite a exportação do desenho em formato .IDF, compatível com o programa *EnergyPlus* (versão 8.7.0). No Quadro 2 apresenta-se a volumetria computacional dos modelos A e F, que se estende para todos os demais modelos, além de mostrar por meio do detalhe as aberturas do galpão munidas de venezianas industriais.

Todos os 12 modelos estudados mantêm a orientação para o posicionamento do lanternim, sentido norte, bem como recomenda Fedyushki (2020). Tal decisão faz com que esse fator não influencie nos resultados obtidos. A simulação computacional dos ambientes industriais segue o ordenamento sem divisão física entre os postos de trabalho, conforme descrito por Lacchini (2010). Desta forma, define-se uma única zona térmica para cálculo em ambientes sem obstruções e compostos por uma massa de ar homogênea. Todos os modelos de galpões simulados possuem venezianas industriais, situadas tanto nas aberturas de entrada de ar quanto no lanternim. A superfície das paredes é dividida em duas partes (a 3m e a 9m de altura) de modo a possibilitar a caracterização de dois componentes de construção diferentes, tal como descrito por Camargos et al. (2021). Scigliano e Hollo (2001) não recomendam o uso do IVN em

galpões dotados de fontes internas de calor, porém tal método é levado em consideração neste estudo no Modelo F, pois segundo Mazon, Silva e Souza (2006) e Camargos *et al.* (2021), tal consideração apresenta resultados mais conservadores quanto ao dimensionamento do lanternim por considerar os coeficientes redutores de área de abertura devido às venezianas industriais.

Quadro 2 – Representação dos modelos computacionais

Variação	Volumetria
Modelo A	
Modelo F	

Fonte: os autores.

Comparativos entre os modelos

Avalia-se os efeitos de alguns parâmetros de construção na temperatura interna de galpões industriais por meio de quatro comparativos, a saber:

- **Comparativo 1** – Galpões com fonte interna de calor versus sem lanternim: Por meio do modelo A e do modelo B, é comparada a influência da presença do lanternim na redução da temperatura interna (dados de saída: T_{bs} interna e externa);
- **Comparativo 2** – Galpões com fontes internas de calor de diferentes potências: Com o auxílio dos modelos C e D, avalia-se, respectivamente, a efetividade da vazão de ar através do lanternim em relação à influência da presença de uma fonte interna de calor, bem como à variação da potência da referida fonte (dados de saída: T_{bs} e vazão);
- **Comparativo 3** – Galpões com áreas das aberturas distintas: Utilizando-se os modelos E, verifica-se a influência das áreas A_e e A_s (altura do lanternim) em quatro configurações distintas, a fim de caracterizar a temperatura interna do galpão e determinar a vazão do ar interno através do lanternim (dados de saída: T_{bs} e vazão).
- **Comparativo 4** - Galpões com altura corrigida do lanternim: Analisa-se a efetividade das mudanças construtivas propostas, comparando os resultados da avaliação da exposição ocupacional entre o Modelo A e o Modelo F. No Modelo F, a altura do lanternim é corrigida levando em consideração a presença das venezianas industriais (dados de saída: T_{bs} e vazão).

Abordagem numérica

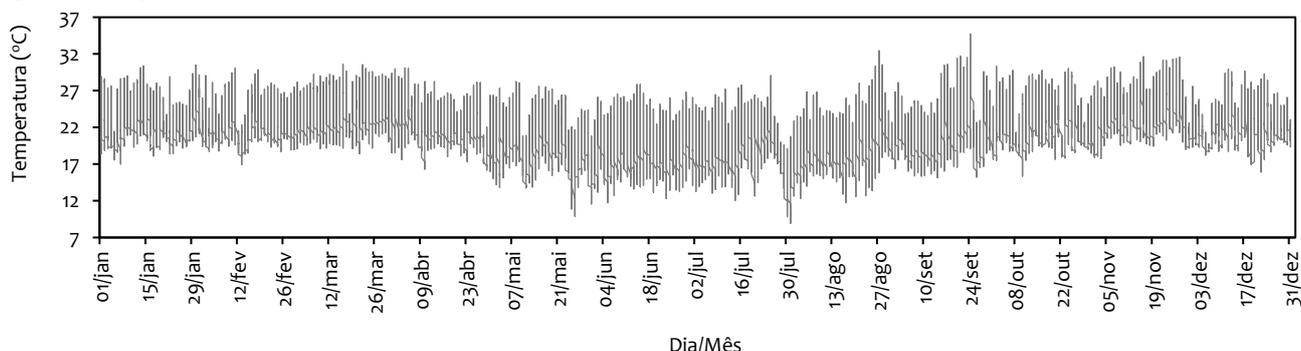
O *EnergyPlus* é um programa de simulação termoenergética que engenheiros, arquitetos e pesquisadores usam para modelar a carga térmica e análise energética para aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e cargas de processos e plugues nas edificações. De acordo com o DOE (2018), a partir da versão 1.3.0 do programa, o modelo de cálculo do fluxo de ar foi renomeado para *AirflowNetwork*. Conforme Gomes (2012), o módulo *AirflowNetwork* simula o desempenho de um sistema de distribuição de ar e calcula o fluxo de ar entre zonas térmicas, levando em consideração a ação do vento ou a distribuição forçada. Camargos et al. (2022) complementam ao ressaltarem que no módulo *AirflowNetwork* são considerados os requisitos de abertura das janelas e portas, bem como as condições de ventilação natural, de acordo com as rotinas de uso e ocupação estabelecidas na localidade climática analisada.

Com base nos estudos de Swami e Chandra (1988) os coeficientes de pressão para a geometria retangular da edificação são calculados automaticamente pelo programa. De acordo com Camargos et al. (2022), as simulações são configuradas para utilizar uma situação de ventilação constante e um fator de abertura de 1 (100%) para todas as aberturas de entrada de ar e lanternim, enquanto os portões são considerados sempre fechados (fator de abertura 0). O algoritmo para o balanço de calor é o CTF (*Conduction Transfer Function*), que considera apenas o calor sensível. Os algoritmos para convecção interna e externa são escolhidos de acordo com as prescrições da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017). O intervalo de tempo entre as simulações (*timestep*) é dividido em quatro, ou seja, a cada 15 minutos. Para os dados de temperatura do solo, são utilizados os dados de Loura (2006), uma vez que a norma NBR 15.575 (ABNT, 2013) não especifica como obtê-los. Ademais, o método de inicialização linear (*Linear initialization Method*) é utilizado, conforme recomendado por Neves (2012), por se adequar à simulação de ventilação natural por efeito chaminé e por estabelecer uma direção adequada para o fluxo de ar durante a simulação.

Período de simulação

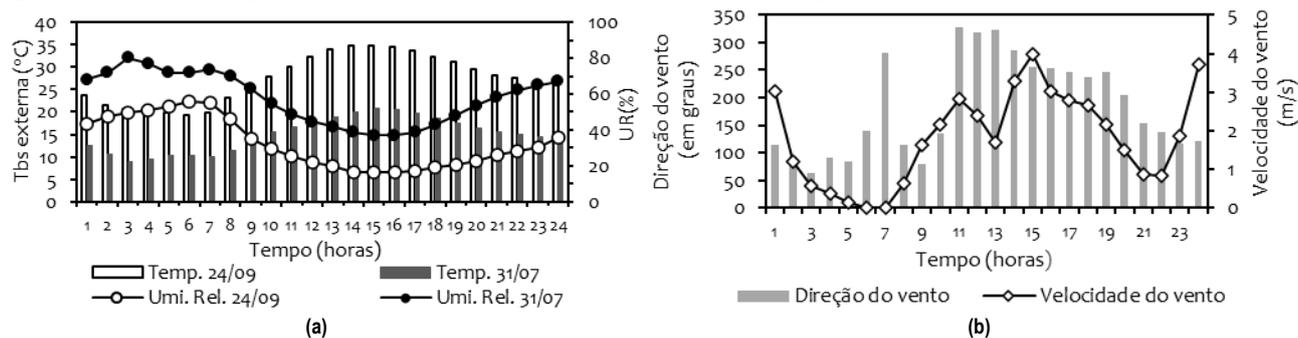
Para uma análise qualitativa, está demonstrada na Figura 3 a evolução anual da T_{bs} externa de Belo Horizonte (ZB3), região da Pampulha (INMET, 2016) segundo o arquivo climático do tipo *Test Reference Year (TRY)* disponibilizado pelo *EnergyPlus* (LBNL, 2022). O arquivo .TRY é obtido pela eliminação de anos que contenham temperaturas médias mensais extremas. É o ano real que mais se aproxima da normal climatológica. Na Figura 4a mostra-se a evolução horária da T_{bs} externa, com máxima de 34,8°C (24/09), mínima de 8,9°C (31/07), além da umidade relativa máxima de 80% (31/07) e mínima de 17% (24/09) registradas nos dias extremos de calor e frio em Belo Horizonte/MG.

Figura 3 – Evolução anual da T_{bs} externa



Fonte: Camargos (2019).

Figura 4 – Outputs. a) Condições climáticas ambientais extremas de verão e inverno. b) Direção e velocidade predominante do vento



Fonte: Camargos (2019)

Considerando o verão como uma condição agravante para a temperatura interna do galpão, todas as simulações computacionais horárias são realizadas para o dia 24/09 durante as 24 horas de atividade. Na Figura 4b mostra-se a direção predominante e a velocidade média do vento atuante em Belo Horizonte/MG no dia extremo de verão. Nota-se que se tomando a hora mais crítica sob o ponto de vista da T_{bs} externa (14h00), o vento predominante está atuante na direção 286° (lado esquerdo da planta, de oeste para leste) com velocidade de $3,29\text{m/s}$. Assim sendo, a simulação é realizada para um período de 1 ano e, com o intuito de simplificar o tempo de resposta, até a definição da melhor configuração para o galpão, no qual são exibidos os resultados mais relevantes ou extremos.

Dados de saída

Faz-se 26 simulações para análise e interpretação dos dados de saída obtidos após a simulação dos modelos objeto deste estudo no *EnergyPlus*. Esses dados incluem: T_{bs} ($^\circ\text{C}$), T_{rm} ($^\circ\text{C}$), UR (%), velocidade do vento (m/s), direção do vento (em graus) e vazão através do lanternim (m^3/s). A T_{bu} ($^\circ\text{C}$) é obtida conforme recomendação de Camargos et al. (2022) e a T_g ($^\circ\text{C}$) é calculada por meio da Equação (4). O IBUTG é determinado pela Equação (3). Os dados da edificação em análise são armazenados no arquivo .IDF (*Input Data File*), que contém os objetos necessários para a simulação. Além disso, é necessário inserir o arquivo .EPW (*EnergyPlus Weather File*), que contém os dados climáticos detalhados por hora. Os resultados da simulação são disponibilizados em planilhas no formato .CSV ou em uma página da web no formato .HTML.

Para alcançar o objetivo desta pesquisa, os dados de saída mencionados anteriormente são utilizados para comparar os 12 modelos mostrados na Tabela 5. Inicialmente, com o intuito de identificar a melhor configuração para o galpão industrial, leva-se em consideração a menor T_{bs} interna. Isso é feito por meio da avaliação da influência de vários parâmetros de construção, como a presença do lanternim, a potência das fontes internas de calor, as dimensões das áreas das aberturas de entrada e saída de ar, a vazão através das aberturas e a aplicação dos coeficientes redutores do método IVN. Com isso, o IBUTG anual do modelo de referência é comparado com o modelo que apresenta o melhor resultado, seguindo as recomendações da NR-15 (Brasil, 2021).

Limitações da pesquisa

Embora o *EnergyPlus* seja uma ferramenta de simulação termoenergética avançada, ressalta-se que a precisão dos resultados depende da qualidade dos dados de entrada e das suposições feitas pelo usuário. Além disso, há outras restrições nesta pesquisa, a saber: a limitação da influência da umidade e do vento predominante na vazão através dos lanternins, a impossibilidade de o programa simular o fluxo de ar, a padronização da vestimenta dos ocupantes, a consideração apenas do dia extremo de verão para a

avaliação da influência dos parâmetros de construção, a não consideração das condições do entorno bem como a presença de galpões vizinhos.

Horas de IBUTG e recomendações da NR-15

Com o objetivo de determinar as horas de IBUTG, a melhor configuração identificada para o galpão industrial (modelo F) é comparada com o modelo de referência (modelo A) em relação aos limites recomendados pela NR-15 (Brasil, 2021). A norma regulamentadora estabelece que, em alguns ambientes quentes, pode ser necessário adotar medidas de prevenção ou controle para garantir a segurança da exposição ocupacional.

Resultados e discussões

Os resultados são obtidos por meio da simulação no *EnergyPlus* (8.7.0). Realizam-se comparações da T_{bs} interna (em °C) e da vazão através do lanternim (em m^3/s) entre os 12 modelos computacionais listados na Tabela 5, com o objetivo de identificar a melhor configuração de galpão industrial que resulta no menor número de horas anuais de IBUTG (em °C) acima do limite estabelecido pela NR-15.

Comparativo 1: Galpões com fonte interna de calor versus sem lanternim

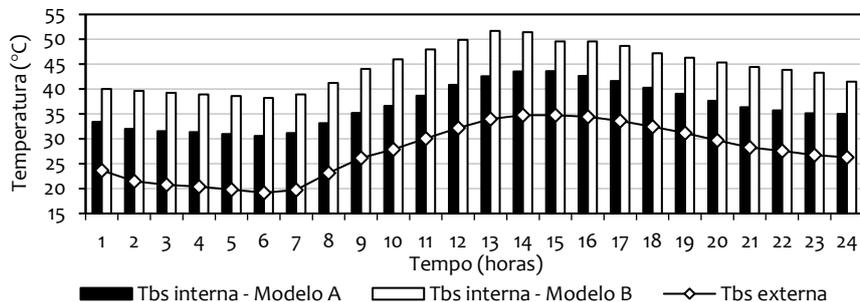
Compara-se a T_{bs} interna (em °C) entre os modelos A e B, a fim de evidenciar a influência do lanternim nos galpões. É importante ressaltar que o único componente de construção alterado nesses modelos é o lanternim, conforme indicado na Tabela 5. Observa-se, pela Figura 4b, que a direção do vento é 289° , atingindo predominantemente o lado esquerdo do galpão em ambos os modelos. No entanto, devido ao lanternim estar posicionado ao longo de toda a extensão da cumeeira, a influência da direção do vento na vazão pode ser desconsiderada, uma vez que é um parâmetro fixo em todos os 12 modelos analisados. O resultado obtido para essa comparação está demonstrado na Figura 5. É possível notar uma redução de até $9,2^\circ C$ na T_{bs} interna do modelo A em relação ao pico máximo de T_{bs} interna do modelo B, que ocorreu durante esse dia extremo de verão às 14h00, o que comprova a extrema necessidade da presença desse equipamento, além de ressaltar a importância de uma ventilação natural adequada em ambientes industriais, especialmente naqueles com fontes de calor. Estudos como o de Mazon, Silva e Souza (2006) comprovam que, com o lanternim, ocorre uma estratificação vertical da temperatura interna nos galpões, variando entre $19^\circ C$ e $31^\circ C$. Fedyushkin (2020) ressaltar que o lanternim permite uma circulação contínua de ar, com a entrada de ar fresco pelo nível inferior e a saída de ar quente pelo nível superior do edifício. Assim como as limitações demonstradas neste estudo, Chen, Lin, Chug e Lai (2022) também destacam que as configurações do objeto (como altura do edifício, geometria, aberturas do edifício, design do lanternim etc.) e o *layout* das divisórias internas podem afetar a dispersão do fluxo de ar proveniente da ventilação e a temperatura interna do galpão.

Comparativo 2: Galpões com fontes internas de calor de diferentes potências

A influência da presença de fontes de calor na temperatura interna das edificações industriais é analisada através da simulação do modelo A versus o modelo C, conforme mostrado na Figura 6. Nota-se que, no modelo C, a T_{bs} interna coincide com a T_{bs} externa durante o pico de temperatura do dia extremo de verão (registrado às 14h00). No entanto, no modelo A, há um aumento de até $8,8^\circ C$ na T_{bs} interna nesse mesmo horário comprovando que a fonte interna de calor acentua a caracterização de um ambiente de trabalho quente. Na Figura 7a mostra-se a vazão no lanternim (abertura do lado

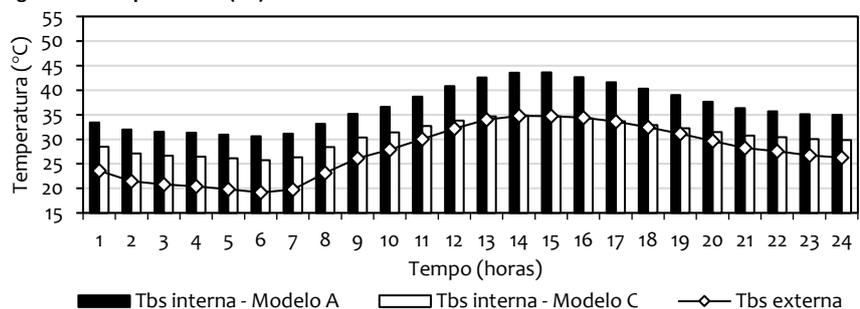
esquerdo) entre os modelos A e C. Além disso, demonstra-se também a simetria entre as vazões através das aberturas do lado esquerdo e direito do lanternim no modelo A.

Figura 5 – Comparativo 1 (T_{bs}). Modelo A versus Modelo B: Influência da presença do lanternim



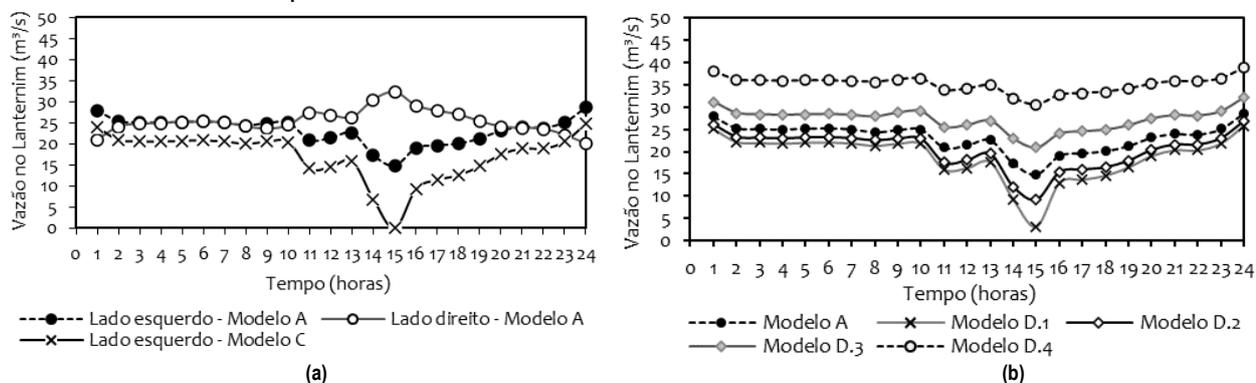
Fonte: os autores.

Figura 6 – Comparativo 2 (T_{bs}). Modelo A versus Modelo C: Influência da fonte interna de calor



Fonte: os autores.

Figura 7 – Comparativo 2 (vazão através do lanternim esquerdo). a) Modelo A versus Modelo C: Influência da fonte interna de calor. b) Modelo A versus Modelos D: Influência da potência da fonte interna de calor



Fonte: os autores.

Em síntese, dependendo da direção do vento predominante, quando uma abertura lateral do lanternim estiver com a vazão máxima, o lado oposto estará com uma vazão mínima. Essa característica de simetria entre as vazões através do lanternim é comum ao longo das 24 horas do dia extremo de verão (Figura 7a). Essa constatação também é feita por Mazon, Silva e Souza (2006) ao relatarem que, em relação ao comportamento do fluxo do ar interno, para uma velocidade de entrada de ar preestabelecida, observa-se um comportamento simétrico, caracterizando o fluxo para um galpão com duas entradas inferiores e duas saídas superiores simétricas.

Quanto à vazão no lanternim, conforme mostrado na Figura 7a, no modelo C há uma redução na vazão do ar interno através da abertura esquerda do lanternim de até 25% (avaliando-se a diferença média entre os valores obtidos). Na Figura 7b, constata-se que existe uma relação entre o aumento da vazão de ar interno através do lanternim e a

presença de fontes de calor com diferentes potências nominais. Observa-se que a vazão através do lanternim varia significativamente ao longo do dia extremo de verão, além de apresentar a mesma variação do contorno mostrada na Figura 7a, indicando a existência da mesma simetria da vazão nas aberturas do lanternim.

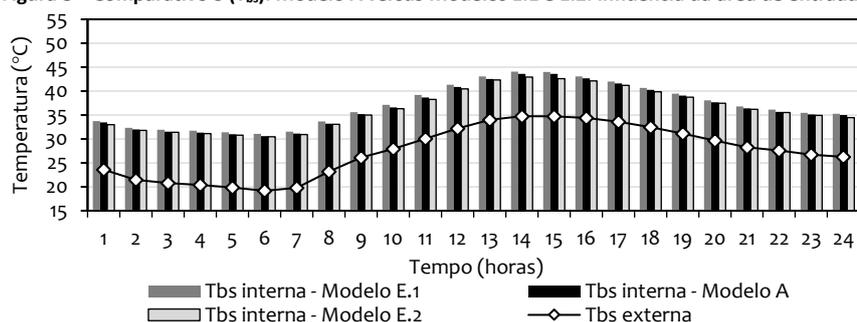
Por meio dos modelos D, avalia-se a influência da potência da fonte interna na intensificação da vazão de ar através do lanternim, cujo resultado está demonstrado na Figura 7b. Ao considerar o horário crítico de verão (14h00), nota-se que o modelo D.1 apresenta uma redução de até 47% na vazão em comparação com o modelo A, enquanto o modelo D.4 registra um aumento de até 85%. Portanto, fica evidente que quanto maior o calor liberado por essas fontes, mais acentuada é a vazão natural do ar interno devido à intensificação do efeito chaminé. Entretanto, à medida que a potência da fonte interna aumenta, a temperatura interna da edificação também aumenta. De acordo com Chen, Lin, Chyng e Lai (2022), o fluxo de ar interno move-se verticalmente para cima sob a influência da flutuabilidade térmica gerada pelas fontes de calor, formando um padrão de fluxo simétrico, conforme também observado na Figura 7a. A intensificação do efeito chaminé pela fonte interna de calor também é discutida por Wang *et al.* (2021) e Pu *et al.* (2022), que comprovam, por meio de seus estudos, a relação entre o fluxo de ar interno e a redução da temperatura em ambientes industriais.

Comparativo 3: Galpões com áreas de aberturas distintas

A análise da influência das áreas das aberturas de entrada e saída de ar na redução da temperatura interna do galpão industrial é realizada através da comparação entre o modelo A e os modelos E.

Na Figura 8 mostra-se a influência das áreas de entrada de ar ao comparar a T_{bs} internado modelo A em relação aos modelos E.1 e E.2, que são detalhados na Tabela 5. É possível observar que a variação da T_{bs} é pouco influenciada frente a amplitude das mudanças de construção necessárias na envoltória da edificação, uma vez que mesmo com o modelo E.2, alcança-se praticamente o mesmo perfil de temperatura interna. Analisando o horário crítico de verão (14h00) observa-se uma redução de até 0,5°C ao comparar o modelo E.1 com o modelo A, e uma redução de até 1,1°C ao comparar o modelo E.1 com o modelo E.2.

Figura 8 – Comparativo 3 (T_{bs}). Modelo A versus Modelos E.1 e E.2: influência da área de entrada de ar

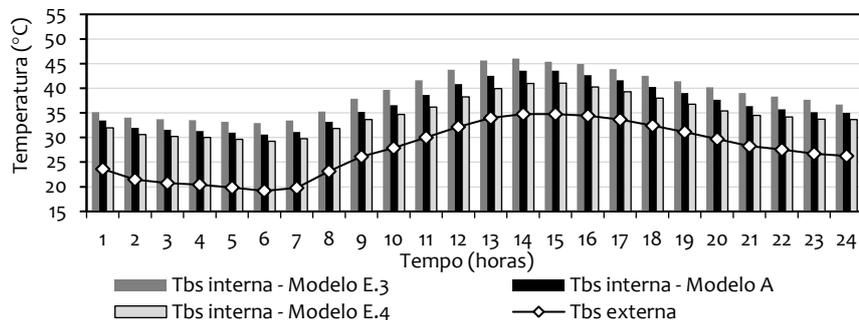


Fonte: os autores.

Na Figura 9 mostra-se a influência das áreas de entrada e saída de ar (ou seja, a altura do lanternim) ao comparar a T_{bs} interna do modelo A com os modelos E.3 e E.4, detalhados na Tabela 5. Ao analisar a variação da temperatura interna do galpão, pode-se inferir que tais mudanças construtivas resultam em alterações significativas, especialmente no horário crítico de verão (14h00). Observa-se uma redução de até 2,5°C ao comparar o modelo E.3 com o modelo A, e uma redução de até 5,1°C ao comparar o modelo E.4 com o modelo E.3.

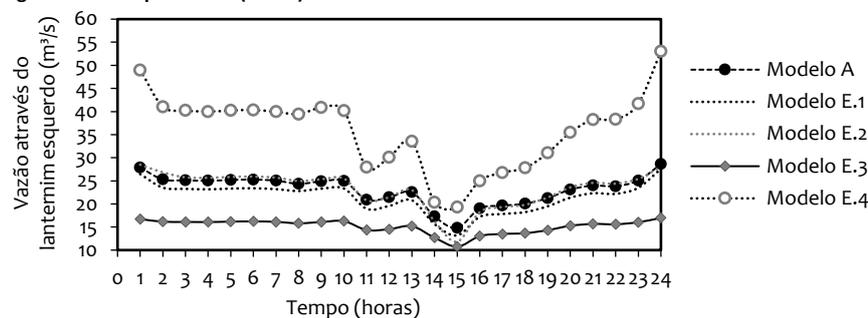
Na Figura 10 ilustra-se a influência das áreas das aberturas na variação da vazão através do lanternim entre os modelos A e E, conforme a parametrização da Tabela 5.

Figura 9 – Comparativo 3 (T_{bs}). Modelo A versus Modelos E.3 e E.4: influência da área de saída de ar (altura do lanternim)



Fonte: os autores.

Figura 10 – Comparativo 3 (vazão). Modelo A versus Modelos E: influência das áreas de abertura de entrada e saída de ar



Fonte: os autores.

Os resultados demonstrados nas Figuras 8 e 9 contradizem diretamente a principal recomendação encontrada na literatura para o dimensionamento das aberturas de galpões em geral, ou seja, aqueles que não possuem fontes internas de calor, conforme sugerido por Clezar e Nogueira (2009) e Scigliano e Hollo (2001) que estipulam que A_e devem ser aproximadamente o dobro das A_s . Clezar e Nogueira (2009) também destacam que, nos galpões sem fontes internas de calor, a vazão tende a aumentar em cerca de 25% quando as áreas das aberturas são equivalentes. No entanto, ao analisar galpões com fontes internas de calor, pode-se observar por meio dos resultados mostrados na Figura 10 que a vazão através do lanternim nos modelos E.1 e E.2 é muito semelhante à vazão no modelo A, o que demonstra a pouca influência da parametrização das áreas das aberturas de entrada de ar nesses modelos. Por outro lado, no horário crítico de verão (14h00), verifica-se uma redução de até 36% na vazão através do lanternim ao comparar o modelo E.3 com o modelo A, e um aumento de até 60% ao comparar o modelo E.4 com o modelo E.3. Esse resultado evidencia que a parametrização das áreas de saída de ar (ou seja, a altura do lanternim) nos galpões com fontes internas de calor tem um efeito positivo tanto na redução da T_{bs} interna quanto na vazão desses modelos.

À vista disso, fica evidenciado por meio dos resultados do comparativo 3 que, se tratando de galpões com fontes internas de calor, para o dimensionamento das aberturas que viabilizam a ventilação natural nessas edificações, têm-se uma diminuição considerável da temperatura interna quando a relação da A_s é maior que A_e . Isso se dá pois, devido à presença dessa fonte de calor, próximo ao lanternim, tem-se uma intensificação do chamado efeito chaminé que contribui diretamente para que haja demasiado aumento da vazão natural do ar quente ali presente, conseqüentemente, intensificando a eficiência da ventilação natural na edificação. A influência de outros fatores externos, como a orientação da edificação, a velocidade e a direção

predominante do vento, não é considerada nesta análise, uma vez que todos os modelos são simulados para o mesmo dia extremo de verão (24/09), e apenas os parâmetros de construção mostrados na Tabela 5 são considerados como as variáveis da comparação. Além disso, para as principais discussões, adota-se o horário mais crítico (14h00), no qual é observado que a velocidade e a direção predominante do vento são, respectivamente, 3,29m/s e 286° (lado esquerda da planta) para todos os modelos, como mostrado na Figura 4b.

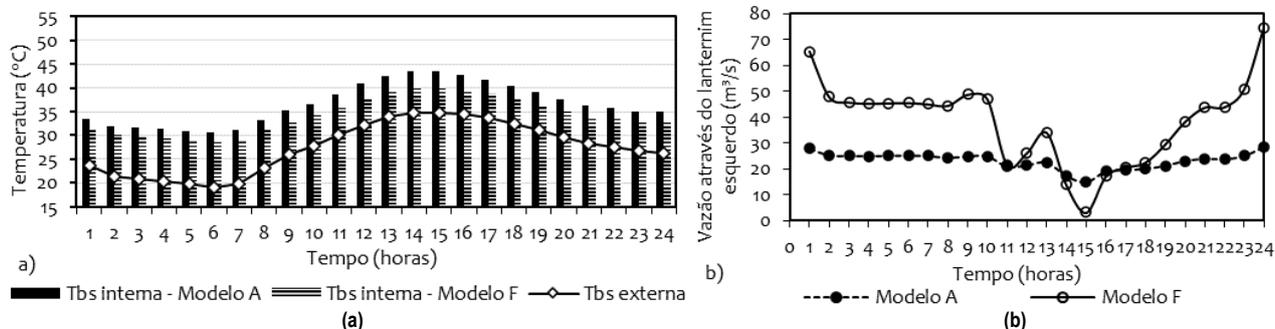
A principal conclusão de Chen, Lin, Chung e Lai (2022) é corroborada por este estudo comparativo. Os autores investigam o parâmetro de projeto mais importante relacionado ao lanternim de um galpão com fonte interna, e também concluem que a altura é o fator dominante quando se trata da ventilação natural impulsionada pela fluutuabilidade térmica, ou seja, a relação A_s . Além disso, os autores destacam que, em condições de altas temperaturas e baixas velocidades do vento ao longo de um período prolongado, o projetista pode aumentar a altura do lanternim o máximo possível para aumentar a eficiência da ventilação. Essa conclusão também está alinhada com a recomendação principal de Fedyushkin (2020), tal como está demonstrado no Quadro 1.

Comparativo 4: Galpões com altura do lanternim corrigida

Considerando a importante correlação entre A_s e a diminuição da T_{bs} interna nos galpões com fonte interna de calor demonstrada no comparativo anterior, faz-se o comparativo 4 por meio do modelo A versus o modelo F com o intuito de analisar a importância da correção da altura do lanternim em função da presença das venezianas industriais.

Na Figura 11 mostra-se os valores da T_{bs} interna do modelo F em comparação com o modelo A. Especificamente, durante o horário crítico às 14h00, é observada uma redução de até 3,3°C na T_{bs} interna (Figura 11a) e um aumento médio de até 63% na vazão de ar através do lanternim (Figura 11b) comparando-se o modelo F com o modelo A ao longo do dia extremo de verão. Esses resultados corroboram com as conclusões do comparativo 3, evidenciando a correlação positiva entre o aumento da A_s e a melhoria da eficiência da ventilação natural em galpões com fonte interna de calor. Conseqüentemente, o modelo F se destaca como a melhor configuração encontrada para o galpão industrial analisado nesta pesquisa, entre os 12 modelos investigados apresentados na Tabela 5. Isso se deve ao menor pico de T_{bs} interna registrado durante o dia extremo de verão belo-horizontino, além de apresentar a maior média de vazão de ar interno através do lanternim nesse mesmo dia.

Figura 11 – Comparativo 4. Modelo A versus Modelos F: Influência da correção da altura do lanternim. a) T_{bs} interna. b) vazão através do lanternim



Fonte: os autores.

Avaliação e controle de ambientes quentes

A metodologia de avaliação da exposição ocupacional ao calor é feita por meio do IBUTG, dado pela Equação (3), a partir da média horária para o período analisado,

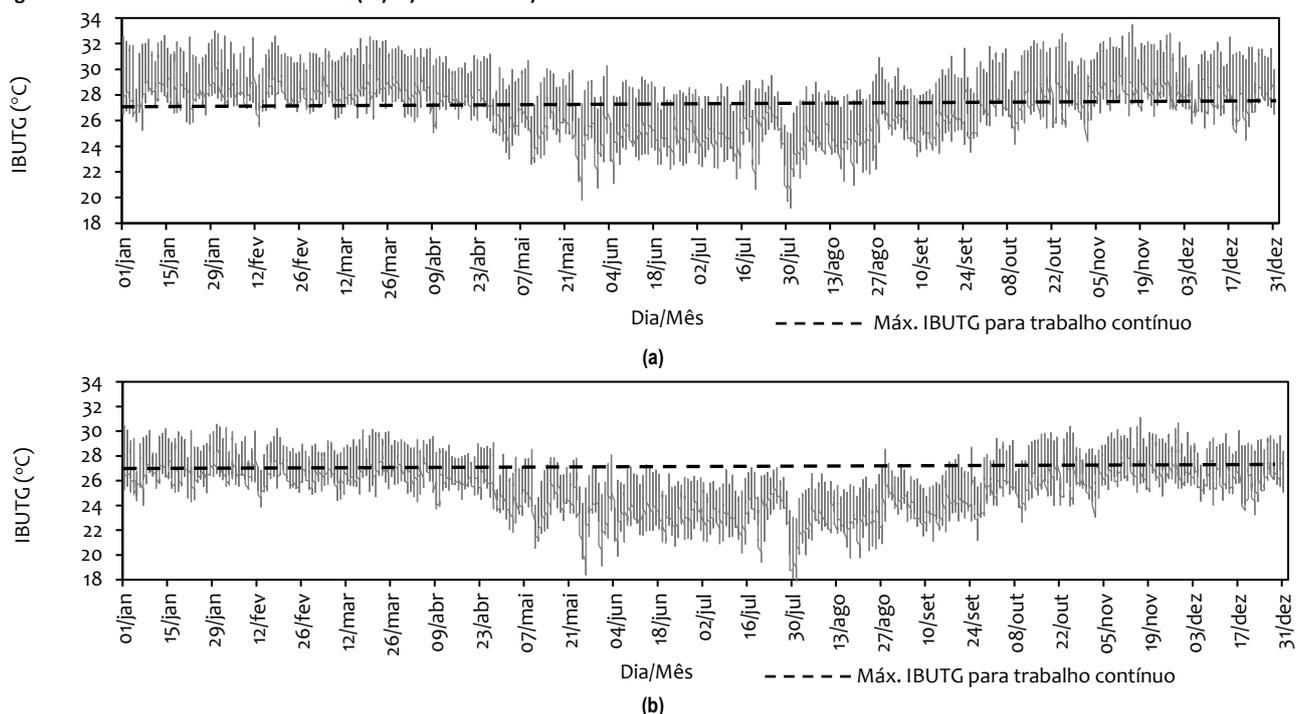
conforme indicado no anexo 3 da NR-15 (Brasil, 2021). Para a tipologia do galpão industrial, compara-se a melhor configuração encontrada (modelo F) com o modelo de referência (modelo A) a fim de atestar os benefícios das mudanças construtivas sugeridas. Na Tabela 6 mostra-se as variáveis ambientais necessárias para a obtenção do IBUTG referente ao dia extremo de verão, cujo limite recomendado pela NR-15 (Brasil, 2021) é 26,7°C. A evolução anual do IBUTG nos modelos A e F estão demonstradas na Figura 12a e na Figura 12b, respectivamente.

Tabela 6 – Variáveis ambientais e IBUTG: modelo A versus a modelo F

Configuração	T _{bs} (°C)	T _{rm} (°C)	UR (%)	v (m/s)	T _g (°C)	T _{bu} (°C)	IBUTG (°C)
Modelo A	43,6	38,2	28,7	2,0	42,3	27,3	31,8
Modelo F	39,8	34,3	27,9	2,0	38,5	24,2	28,5

Fonte: os autores.

Figura 12 – Resultados anuais do IBUTG (°C). a) Modelo A. b) Modelo F



Fonte: os autores.

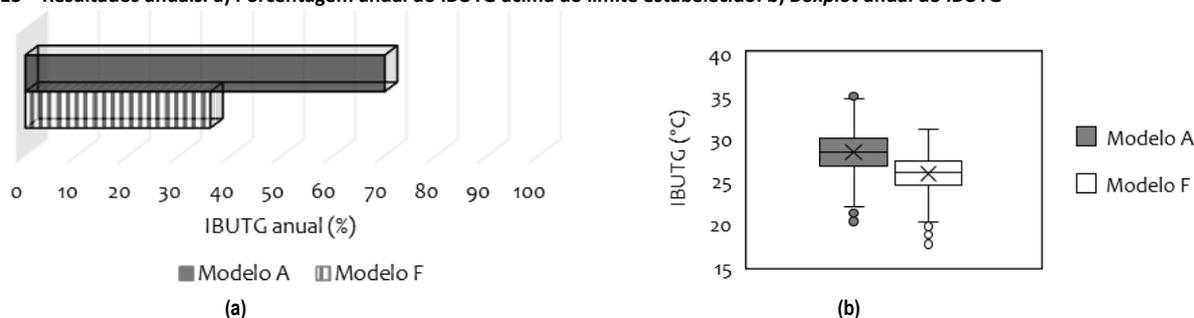
Com base nos resultados da Tabela 6, observa-se que, para o modelo A, o IBUTG interno excede em até 5,1°C a recomendação máxima estabelecida pela NR-15 (Brasil, 2021), enquanto, para o modelo F, esse índice é ultrapassado em até 1,8°C. Ademais, percebe-se que, frente ao resultado obtido com o modelo A, no modelo F tem-se uma melhoria no desempenho térmico do galpão industrial de até 3,3°C para o IBUTG referente ao dia extremo de verão. É possível observar que as intervenções construtivas propostas para o galpão industrial têm impactos positivos na condição de exposição ocupacional desse ambiente de trabalho. Especificamente em relação ao dia extremo de verão, que representa uma condição desafiadora para o aumento da temperatura interna da edificação, é improvável que qualquer intervenção de construção focada na ventilação natural fosse capaz de alcançar os limites de IBUTG sem a implementação de medidas de mitigação.

Posto isso, de acordo com a NR-15 (Brasil, 2021), com base no IBUTG obtido no modelo A (Tabela 6), não é permitido adotar um regime de trabalho intermitente sem a implementação de medidas adequadas de controle para as atividades laborais. Essas medidas incluem a instalação de climatizadores artificiais nas áreas em que os

funcionários permanecem por longos períodos, controle da umidade do ar, cumprimento das pausas para recuperação previstas na legislação, seleção adequada dos trabalhadores com avaliação médica e, se possível, monitoramento da temperatura timpânica. Entre outras medidas viáveis para adoção. No entanto, para o modelo F, com o IBUTG apresentado na Tabela 6, a NR-15 (Brasil, 2021) estabelece que um regime de trabalho de 30min., seguidos de 30min. de descanso deve ser adotado nessa condição extrema de exposição ocupacional. Os resultados obtidos estão em concordância com as principais conclusões dos estudos realizados por Amorim *et al.* (2020) e Teimori *et al.* (2020). Em ambos os estudos, mesmo com as mudanças de construção, foi necessário adotar medidas de controle para a exposição ocupacional. Além disso, os valores médios de IBUTG encontrados para o exercício laboral no verão estão em acordo com os valores encontrados medidos *in loco* por Wang *et al.* (2016), Kakaei *et al.* (2019) e Meng, Xiong, Yang e Cao (2021). Esse fato atesta a eficácia do algoritmo numérico desenvolvido nesta pesquisa para calcular o IBUTG utilizando-se das variáveis ambientais obtidas por simulação numérica. Portanto, como também concluíram Meng, Xiong, Yan e Cao (2022) e Bach *et al.* (2023), a abordagem do IBUTG demonstra ser uma excelente forma de seleção para avaliar a exposição ao estresse térmico em locais de trabalho, levando em consideração a faixa de T_{bs} e UR% analisada, bem como a adoção das medidas atenuantes recomendadas para galpões industriais com fontes internas.

Na Figura 13a, é apresentado o percentual anual em que o IBUTG ultrapassa o valor máximo indicado pela NR-15 (Brasil, 2021) ao considerar as 8.760 horas do ano-tipo simulado para os modelos A e F. Já na Figura 13b, é exibido o *boxplot* dos resultados anuais do IBUTG para os modelos A e F. Nesse gráfico, o símbolo 'x' representa a média, a área retangular representa o primeiro quartil (25% dos resultados estão abaixo desse valor) e o terceiro quartil (75% dos resultados estão abaixo desse valor), enquanto a linha que atravessa o retângulo representa a mediana dos resultados.

Figura 13 – Resultados anuais. a) Percentagem anual do IBUTG acima do limite estabelecido. b) *Boxplot* anual do IBUTG



Fonte: os autores.

Na Figura 13a, ao comparar o modelo F com o modelo A, verifica-se que o modelo F apresenta apenas 36% das horas do ano acima do limite de IBUTG. Além disso, na Figura 13b, é evidenciado que os resultados do modelo F possuem valores médios mais baixos e uma maior concentração de resultados no primeiro quartil. Isso indica que há um maior número de dias, durante o ano-tipo, com valores de IBUTG abaixo da média registrada. Esses resultados confirmam a hipótese do estudo e demonstram que, especialmente em galpões com fonte interna de calor, uma área de saída de ar maior está diretamente relacionada a um melhor desempenho térmico da edificação. Isso se traduz na obtenção de menores picos de temperatura interna, evidenciando a importância dessa modificação para o controle do ambiente térmico.

Conclusão

O presente estudo tem por objetivo investigar o efeito da implementação de medidas atenuantes à exposição ocupacional acima do limite de IBUTG na tipologia de galpão industrial em BH/MG. Para tanto propuseram-se 12 variações do modelo computacional de modo a identificar qual alteração de construção poderia possibilitar um maior período em conformidade com as recomendações da NR-15 (Brasil, 2021).

O modelo F representa a melhor configuração identificada neste estudo, demonstrando uma redução significativa da T_{bs} interna. Nesse modelo, o galpão possui uma A_s superior em relação à A_e , o que é alcançado por meio da aplicação dos coeficientes do método IVN que consideram a presença das venezianas industriais para a correção da altura do lanternim. Esse resultado contradiz as principais recomendações encontradas na literatura para o projeto de galpões em geral. No entanto, em galpões com fonte interna de calor, especialmente aqueles com alto nível de calor liberado, a presença dessa fonte contribui para intensificar o efeito chaminé, aumentando a vazão natural do ar quente no interior da edificação através do lanternim.

Por definição, o IBUTG é um dos principais indicadores das condições térmicas em ambientes laborais quentes. Além disso, é comprovado que o estresse térmico tem um impacto direto na produtividade dos trabalhadores. Portanto, o IBUTG se mostra como um excelente indicador de produtividade para as empresas. Nesse sentido, para aumentar a produção e garantir colaboradores mais eficientes, é necessário assegurar níveis adequados desse índice, seguindo os limites estabelecidos na NR-15 (Brasil, 2021). Para tanto, é fundamental considerar o aproveitamento da ventilação natural de forma eficiente no processo de concepção e projeto dos galpões industriais, com o objetivo de reduzir as possibilidades de estresse térmico dos trabalhadores.

Mesmo com o modelo F, constata-se um alto IBUTG para a situação analisada, o que implica necessariamente na adoção de medidas de proteção e controle durante a jornada de trabalho. Entretanto, o objeto de estudo apresenta-se como uma solução de construção viável, uma vez que, nessas condições climáticas extremas de verão e com a carga térmica interna assumida, nenhuma estrutura, seja de aço ou alvenaria, seria capaz de proporcionar condições de conforto térmico satisfatórias. Portanto, é aconselhável levar em conta opções de materiais e sistemas de construção que assegurem a ventilação natural, tanto durante a fase de concepção quanto na reforma de edifícios existentes, sob o viés econômico. De fato, além de simplesmente climatizar, é de suma importância garantir a plena realização das atividades laborais a fim de alcançar níveis mais elevados de produtividade, sem comprometer a saúde dos trabalhadores.

Destaca-se como a principal contribuição deste estudo o fato de que, no caso de galpões com fonte de calor presente, a melhoria da condição térmica interna está diretamente relacionada ao aumento da área destinada à saída de ar. Contudo, é importante ressaltar que esse resultado é específico para o objeto investigado e para as condições climáticas selecionadas. Para explorar aplicações práticas e taxas de ventilação em outras condições, é necessário realizar novos testes sob condições climáticas específicas. As configurações do objeto, como a altura do edifício, geometria, disposição das aberturas e *design* do lanternim, bem como o *layout* das divisórias internas, podem afetar o desempenho do galpão industrial. Embora a investigação desses temas, como as condições do vento, parâmetros do entorno e divisão interna, não seja o foco deste estudo, seria válido discuti-los.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG) pelo apoio, bem como aos órgãos Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e CEFET/MG por fornecerem suporte financeiro.

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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: ABNT, 2005. 34 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1**: Edificações habitacionais –Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 71 p.

ALLARD, F. (ed.). **Natural ventilation in building**: a design handbook. London: James & James, 1998. 356 p.

AMORIM, A. E. B.; LABAKI, L. C.; MAIA, P. A.; BARROS, T. M. S.; MONTEIRO, L. R. Exposição ocupacional ao calor em atividades a céu aberto na construção de estruturas de edifícios. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 231-245, jan./mar. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000100371>.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2017. 66 p.

BACH, A.; PALUTIKOF, J.; TONMOY, F.; SMALLCOMBE, J.; RUTHERFORD, S.; JOARDER, A.; HOSSAIN, M.; OLLIE, J. Retrofitting passive cooling strategies to combat heat stress in the face of climate change: A case study of a ready-made garment factory in Dhaka, Bangladesh. **Energy and Buildings**, v. 286, p. 112954, May 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112954>.

BAEZA, E.; PÉREZ-PARRA, J.; LOPEZ, J.; MONTERO, J. CFD study of the natural ventilation performance of a parral type greenhouse with different numbers of spans and roof vent configurations. **Acta Horticulturae**, v. 719, p. 333–340, 2006. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.37>.

BORDIGNON, A. L. **Equipamentos elétricos industriais**: material didático. 2. ed. Juiz de Fora: UFJF, 2014, 68 p.

BOWER, J. **Understanding Ventilation**: How to design, select, and install residential ventilation systems. Boise: The Healthy House Institute, 1995. 428 p.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **NR-15 - Atividades e Operações Insalubres**. Brasília: Ministério do Trabalho e Previdência, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acao-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-15-atualizada-2022.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2023.

CAMARGOS, B. H. L. **Desempenho térmico de galpões industriais equipados com lanternins**. 2019. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/16044>. Acesso em: 17 jan. 2024.

CAMARGOS, B. H. L.; SOUZA, H. A.; GOMES, A. P.; LADEIRA, A. H.; REIS, R. A.; MAPA, L. P. P. Implementation of a code to obtain globe and wet-bulb temperatures for application of the WBGT index in the evaluation of the thermal performance of industrial sheds via computational simulations. In: **OPEN Science Research I**, v. 1, cap. 201, p. 2599-2609, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.37885/220107251>.

CAMARGOS, B. H. L.; SOUZA, H. A.; GOMES, A. P.; LADEIRA, A.; REIS, R. A.; MAPA, L. P. P. Naturally ventilated industrial sheds: an investigation about the influence of wind direction in flow rate efficiency in continuous roof

vents. **Revista Internacional de Métodos numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 37, n. 1, p. 1-18, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.23967/j.rimni.2021.01.007>.

CHEN, C.-M.; LIN, Y.-P.; CHUNG, S.-C.; LAI, C.-M. Effects of the design parameters of ridge vents on induced buoyancy-driven ventilation. **Buildings**, v. 12, n. 2, p. 112-125, Jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12020112>.

CHU, C.-R.; LAN, T.-W. Effectiveness of ridge vent to wind-driven natural ventilation in monoslope multi-span greenhouses. **Biosystems Engineering**, v. 186, p. 279–292, Oct. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.08.006>.

CLEZAR, C. A.; NOGUEIRA, A. R. **Ventilação industrial**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2009. 240 p.

COSTA, E. **Ventilação**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 256 p.

DOE. - U.S. Department of Energy. U. S. **Building Technologies Office**. 2018. Disponível em: http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/alpha_list.cfm. Acesso em: 17 jan. 2024.

FEDYUSHKIN, A. I. Numerical simulation and analysis of the efficiency of natural ventilation in industrial buildings. **Journal of Applied Mechanics and Technical Physics**, v. 61, p. 936–944, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1134/S002189442006005X>.

GERALDI, M. S.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R.; BORGSTEIN, E.; YUKIZAKI, A. Y. G.; MAIA, A. C. B.; SOARES, J. B.; SANTOS JUNIOR, A. Assessment of the energy consumption in non-residential building sector in Brazil. **Energy and buildings**, v. 273, p. 112371, Oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112371>.

GOMES, A. P. **Método de avaliação do desempenho térmico de edifícios comerciais e residenciais em Light Steel Framing**. 2012. 166 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6032>. Acesso em: 18 mai. 2023.

GOURLIS, G.; KOVACIC, I. Building information modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – A case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, Part. 2, p.953–963, Feb. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.009>.

HERAVI, G.; FATHI, M.; FAEGHI, S. Evaluation of sustainability indicators of industrial buildings focused on petrochemical projects. **Journal of Cleaner Production**, v. 109, p. 92-107, Dec. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.133>.

IDEL'CIK, I. **Memento des pertes de charge**: Coefficients de pertes de charge singulières. França: Eyrolles, 1969, 504 p. *apud* CLEZAR, C.; NOGUEIRA, A. **Ventilação Industrial**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2009. 240 p.

IFFA, E.; TARIKU, F. Attic baffle size and vent configuration impacts on attic ventilation. **Building and Environment**, v. 89, p. 28-37, July 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.028>.

INCROPERA, F.; DEWITT, D.; BERGMAN, T.; LAVINE, A. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 664 p.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Arquivos climáticos INMET 2016**. 2016. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>. Acesso em: 17 jan. 2024.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7243: 2017**: Ergonomics of the thermal environment - Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. 3. ed. [s.l.], Genève: ISO, 2017. 18 p.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730:2005** - 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. 3. ed. Genève: ISO[s.l.], 2005, 52 p.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8996:2004** - Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. 2. ed. [s.l.], Genève: ISO, 2004, 24 p.

IZADYAR, N.; MILLER, W.; RISMANCHI, B.; GARCIA-HANSEN, V. Impacts of façade openings' geometry on natural ventilation and occupants' perception: A review. **Building and Environment**, v. 170, p.106613, Mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106613>.

KAKAEI, H.; OMIDI, F.; GHASEMI, R.; SABET, M.; GOLBABAEI, F. Changes of WBGT as a heat stress index over the time: A systematic review and meta-analysis. **Urban Climate**, v. 27, p. 284–292, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.009>.

LACCHINI, A. S. **Desempenho Termoenergético de Edificações Industriais**. 2010. 206 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/31986><http://hdl.handle.net/10183/31986>. Acesso em: 18 mai. 2023.

LBNL. LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **EnergyPlus engineering reference: EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation**. Berkeley: LBNL; U.S. Department of Energy, 2022. Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/EngineeringReference.pdf. Acesso em: 17 jan. 2024.

LOURA, R. M. **Procedimento de identificação de variáveis e análise de sua pertinência em avaliações termo energéticas de edificações**. 2006. 212 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação industrial e controle da poluição**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1990, 416 p.

MAZON, A. A.; SILVA, R. G. O.; SOUZA, H. A. Ventilação natural em galpões: o uso de lanternins nas coberturas. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 2, p. 179-184, jun. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672006000200007>.

MENG, X.; XIONG, H.; YANG, H.; CAO, Y. Dynamic prediction of indoor wet bulb globe temperature in an industrial workshop. **Applied Thermal Engineering**, v. 195, p.117219, Aug. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117219>.

MENG, X.; XUE, S.; AN, K.; CAO, Y. Physiological Indices and subjective thermal perception of heat stress-exposed workers in an industrial plant. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5019, Apr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14095019>.

NEUFERT, E. **Arte de projectar em arquitectura**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2006. 672 p.

NEVES, L. **Chaminé solar como elemento indutor de ventilação natural em edificações**. 2012. 142 f. Tese (Doutorado em Ciências da Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2012.866232>.

VAN OVERBEKE, P.; VOGELEER, G.; MENDES, L.; BRUSSELMAN, E.; DEMEYER, P.; PIETERS, J. Methodology for airflow rate measurements in a naturally ventilated mock-up animal building with side and ridge vents. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 153-163, Aug. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.036>.

PU, J.; YUAN, Y.; JIANG, F.; ZHENG, K.; ZHAO, K. Buoyancy-driven natural ventilation characteristics of thermal corridors in industrial buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104107, June 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104107>.

SCIGLIANO, S.; HOLLO, V. **IVN - Índice de ventilação natural: Conforto térmico em edifícios comerciais e industriais em regiões de clima quente**. São Paulo: Pini, 2001, 279 p.

SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. Correlations for pressure distribution of buildings and calculation of natural-ventilation airflow. **Ashrae Transactions**, v. 94, pt. 1, p. 243-266, 1988. Disponível em: https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_3362.pdf. Acesso em: 17 jan. 2024.

TEIMORI, G.; MONAZZAM, M. R.; NASSIRI, P.; GOLBABAEI, F.; DEGHAN, S. F.; GHANNADZADEH, M. J.; ASGHARI, M. Applicability of the model presented by Australian Bureau of Meteorology to determine WBGT in outdoor workplaces: A case study. **Urban Climate**, v. 32, p. 100609, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100609>.

TIAN, G.; FAN, Y.; WANG, H.; PENG, K.; ZHANG, X.; ZHENG, H. Studies on the thermal environment and natural ventilation in the industrial building spaces enclosed by fabric membranes: A case study. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101651, Nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101651>.

TINÔCO, I. Avicultura Industrial: Novos conceitos de materiais, concepções e técnicas construtivas disponíveis para galpões avícolas brasileiros. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 3, n. 1, p. 1-26, jan. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-635X2001000100001>.

WANG, Y.; GAO, J.; XING, X.; LIU, Y.; MENG, X. Measurement and evaluation of indoor thermal environment in a naturally ventilated industrial building with high temperature heat sources. **Building and Environment**, v. 96, p.35-45, Feb. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.014>.

WANG, Y.; ZHAO, T.; CAO, Z.; ZHAI, C.; WU, S.; ZHANG, C.; ZHANG, Q.; LV, W. The influence of indoor thermal conditions on ventilation flow and pollutant dispersion in downstream industrial workshop. **Building and Environment**, v. 187, p. 107400, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107400>.

ZHANG, H.; YANG, D.; TAM, V. W. Y.; TAO, Y.; ZHANG, G.; SETUNGE, S.; SHI, L. A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, p. 110795, May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110795>.

1 Bruno Henrique Lourenço Camargos

Engenheiro Civil. Doutorando em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Endereço postal: Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, Brasil, 30510-000.

2 Henor Arthur de Souza

Engenheiro Mecânico. Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professor titular aposentado da Universidade Federal de Ouro Preto. Endereço Postal: Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, Ouro Preto-MG, Brasil, 35400-000.

3 Raquel Diniz Oliveira

Arquiteta e Urbanista. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professora do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Endereço postal: Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, Brasil, 30510-000.

4 Adriano Pinto Gomes

Arquiteto e Urbanista. Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto. Professor do Instituto Federal de Minas Gerais-Campus Ouro Preto. Endereço postal: Rua Pandiá Calógeras, 898, Morro do Cruzeiro, Ouro Preto-MG, Brasil, 35400-000.

5 Luma de Souza Dias

Engenheira Civil. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto. Endereço postal: Universidade Federal de Ouro Preto. Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, Ouro Preto-MG, Brasil, 35400-000.

6 Thalita Cardoso Dias

Engenheira Civil. Doutoranda em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Endereço postal: Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, Brasil, 30510-000.