XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Estudo do impacto da exaustão pela cobertura de galpões industriais sobre o conforto térmico por meio da fluidodinâmica computacional

Estudio del impacto de la ventilación por extracción de la cubierta de naves industriales sobre el confort mediante dinámica de fluidos computacional

Study of the impact of exhaust through the roof of industrial warehouses on thermal comfort using computational fluid dynamics

Conforto térmico / *Confort térmico / Thermal comfort*

Suzuki, Eliane Hayashi
Doutora, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil, elisuzuki@ipt.br

Vittorino, Fulvio
Doutor, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil, fulviov@ipt.br

Aquilino, Marcelo de Mello
Mestre, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil, aquilino@ipt.br

Resumo

A avaliação dos ambientes térmicos em locais de trabalho é determinada por normas regulamentadoras que estipulam limites para conforto e para estresse térmico; no entanto, os códigos de obra e edificações apresentam requisitos gerais como porcentagem de abertura para garantir taxas de ventilação adequadas. Esta pesquisa propõe o uso de exaustores eólicos de um galpão industrial de pequeno porte por meio de fluidodinâmica computacional, para verificação das condições mínimas de trabalho para exposição ao calor. Foi considerada uma planta genérica com a proposição de cenários com e sem fontes de calor, e com alteração da geometria das janelas. Resultados indicaram que os exaustores eólicos são eficientes na remoção da carga térmica, porém não são suficientes para garantir conforto térmico. O estudo na fase de projeto e a verificação dos detalhes por meio da simulação em CFD são importantes para prevenir problemas futuros de insalubridade e desconforto térmico em edifícios industriais.

Palavras-chave: Edifício industrial. CFD. Exaustor eólico. Ventilação. Simulação

Resumen

La evaluación de los ambientes térmicos en los lugares de trabajo viene determinada por normas reglamentarias que estipulan límites de confort y estrés térmico; sin embargo, los códigos de edificación tienen requisitos generales como el porcentaje de aberturas para garantizar índices de ventilación adecuados. Esta investigación propone el uso de extractores eólicos en una pequeña nave industrial mediante dinámica de fluidos computacional para comprobar las condiciones mínimas de trabajo para la exposición al calor. Se consideró una planta genérica, proponiéndose escenarios con y sin fuentes de calor, y con geometría de ventanas alterada. Los resultados mostraron que los extractores eólicos son eficaces para eliminar la carga térmica, pero no bastan para garantizar el confort térmico. Estudiar la fase de diseño y comprobar los detalles mediante simulación CFD es importante para prevenir futuros problemas de insalubridad e incomodidad térmica en edificios industriales.

Palabras clave: Edificio industrial. CFD. Ventilador extractor de viento. Ventilación. Simulación.

Abstract

The assessment of thermal environments in workplaces is determined by regulatory standards that stipulate limits for comfort and thermal stress; however, building and construction codes present general requirements such as percentage of opening to ensure adequate ventilation rates. This research proposes the use of wind turbine exhaust fan in a small industrial warehouse using computational fluid dynamics to verify the minimum working conditions for heat exposure. A generic plant was considered with the proposition of scenarios with and without heat sources, and with changes in the geometry of the windows. Results indicated that wind exhaust fans are efficient in removing the thermal load, but are not sufficient to ensure thermal comfort. The study in the design phase and the verification of details by means of CFD simulation are important to prevent future problems of unhealthiness and thermal discomfort in industrial buildings.

Keywords: Industrial building. CFD. Wind exhaust fan. Ventilation. Simulation.

Introdução

Em locais de trabalho, as condições térmicas às quais os trabalhadores estão expostos são regidas pelas Normas Regulamentadoras (NR) 15 (Brasil, 2022a) e 17 (Brasil, 2022b) do Ministério do Trabalho. A NR-15 estabelece "Limite de Tolerância" às condições de exposição no local de trabalho para evitar que os trabalhadores estejam expostos a condições insalubres causadas pela elevada taxa metabólica, ou devido às cargas térmicas de fontes internas que incidem sobre os trabalhadores. Já a NR-17 (Brasil, 2022b) define as condições ambientais que produzirão condições de conforto térmico “nos locais de trabalho em ambientes internos onde são executadas atividades que exijam manutenção da solicitação intelectual e atenção constantes” (Brasil, 2022b).

Nos ambientes industriais, onde os trabalhos são realizados sob ar comprimido em tubulões pneumáticos e túneis pressurizados, a NR-15 (Brasil, 2022a) estabelece requisitos em relação à ventilação e ao índice de bulbo úmido termômetro de globo (IBUTG). Para as situações em que o trabalho ocorre “em ambientes fechados ou ambientes com fonte artificial de calor”, na NR-15 (Brasil, 2022a) são estabelecidos valores limites para o IBUTG em função da taxa metabólica do trabalhador. Na maioria das vezes, não é possível intervir no processo produtivo para reduzir a carga térmica liberada e a climatização artificial é onerosa em galpões industriais. Nesse quadro, a principal alternativa para evitar a sobrecarga térmica é a renovação do ar do ambiente, seja por meios naturais ou por meios artificiais.

A ventilação natural conta exclusivamente com aberturas verticais e horizontais das edificações, tais como janelas, lanternins e *sheds*. Dependendo das dimensões do ambiente, do clima local e da carga térmica gerada por equipamentos internos, esses elementos não garantem a renovação de ar necessária, recorrendo-se a sistemas de exaustão forçada. A Figura 1 mostra um exemplo de modelo comercial de exaustor eólico e a Figura 2, os exaustores instalados na cobertura. Tal dispositivo pode ser acionado pela ação dos ventos, como alternativa aos exaustores acionados por motor elétrico. O exaustor possui aletas de alumínio e base em aço galvanizado e pode obter uma vazão de até 4000 m^3/h, de acordo com fabricantes. Estudos brasileiros mostram o uso de exaustores eólicos em ambientes protegidos, destinados ao confinamento de animais e à armazenagem de grãos (Brasil, 2004).

Figura 1: Exaustor eólico



Fonte: Ventcenter (2018)

Figura 2: Exaustores instalados na cobertura



Fonte: Exaustão Ambiental Arujá (2025)

Estudar a ventilação de galpões não é um tema novo. Camargos et al (2024) desenvolveram um estudo paramétrico de simulações térmicas em um galpão de médio porte (3.000 m^2), variando a presença de lanternins, de fontes internas de calor e das dimensões das áreas de entrada e saída de ar. O cenário que apresentou menor temperatura do ar interno foi a configuração com área de saída maior do que a de ar de entrada. Parâmetros como altura, geometria, formato do lanternim, localização das aberturas e disposição de divisórias internas influenciaram o desempenho da ventilação no galpão. A presença de fontes internas de calor aumentou a movimentação do ar no ambiente, por efeito chaminé. Contudo, estudos como este adotam a hipótese de que o ar no interior do ambiente está perfeitamente misturado e que a temperatura do ar interno é homogênea nas zonas térmicas definidas no modelo.

As ferramentas de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) ainda é utilizada em menor escala do que as ferramentas de modelagem de ambientes com o conceito de zonas térmicas, na maior parte das vezes pelo elevado tempo computacional necessário. Pu et al. (2022) realizaram estudos de ventilação em um corredor de um edifício industrial e constataram que a ventilação natural é capaz de melhorar as condições ambientais, porém, quando há obstáculos no ambiente interno, ocorre uma alteração do fluxo de ar, influenciando o efeito de resfriamento. A partir de simulações em CFD, variaram-se as fontes de calor e a razão das aberturas e verificaram que a altura da fonte de calor tem um efeito significativo, assim como a distância entre entrada e saída de ar.

Na prática de mercado no Brasil, o estudo da eficiência de ventilação em galpões industriais é conduzido de maneira mais simplificada. O projeto de ventilação mecânica normalmente é

considerado a partir do volume do recinto e da carga térmica estimada, muitas vezes sem a verificação de detalhes importantes como estratificação de temperatura, áreas de ar estagnado e presença de obstruções na zona ocupada. Os estudos mais elaborados são exigidos por organizações avaliadoras de certificações de edifícios: a certificação Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), por exemplo, apresenta pré-requisito de desempenho mínimo de qualidade do ar interior, inclusive para edificações de galpões e centros de distribuição. No caso de espaços mecanicamente ventilados, deve ser atendida a norma ASHRAE Standard 62.1 (ASHRAE, 2022) no que se refere ao cálculo da taxa de ventilação, projeto de exaustão de ar e critérios de construção e operação, e garantir uma forma de monitoramento da vazão de ar externo (U.S. Green Building Council, 2023).

Diante disso, o objetivo deste trabalho é estudar a eficácia dos sistemas de exaustão mecânica na cobertura de galpões industriais sob condições de contorno típicas desta tipologia, para verificação das condições mínimas de trabalho no que diz respeito à exposição de calor e a possibilidade de garantir conforto térmico.

Método

Nesta pesquisa, foram realizados estudos de ventilação em uma planta genérica de edifício industrial de pequeno porte, por meio de simulação por CFD. Considerou-se um cenário inicial e alguns estudos paramétricos em que se variaram presença e ausência de fontes de calor internas e a geometria das aberturas, alterando a proporção entre largura e altura de janelas.

As análises foram realizadas utilizando-se de simulação computacional fluidodinâmica no Fire Dynamic Simulation (FDS) v. 6.1, que é um programa livre e de código aberto, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (*National Institute of Standards and Technology*, NIST) (NIST, 2024), do Departamento de Comércio dos Estados Unidos. O programa FDS é comumente utilizado em estudos de propagação de fumaça e segurança contra incêndio, no entanto, possui um código do tipo LES (*Large-eddy simulation*) para fluxos de baixa velocidade, adequado para fenômenos transitórios. As visualizações foram geradas no programa Smokeview (SMV), que utiliza os gráficos tridimensionais da biblioteca OpenGL. A Figura 3 mostra o modelo do galpão, que representa linhas de produção de indústrias mecânicas de pequenas peças que podem ser

usinadas em tornos mecânicos de pequeno a médio porte, com dimensões de 20,0 m x 40,0 m x 6,0 m (largura x comprimento x altura).

Figura 3: Vistas gerais do modelo



(a) (b)

As aberturas foram dimensionadas de acordo com o Código de Obras e Edificações da cidade de Diadema/SP (Diadema, 1996), que especifica que a área de abertura deve ser de 10% da área do piso; para tanto, consideraram-se dez janelas laterais de 2,0 m x 4,0 m e peitoril de 1,5 m, sendo cinco janelas de cada lado. Foram posicionados dez exaustores eólicos de 0,5 m x 0,5 m com espaço de 3,75 m entre si na cobertura e atribuída uma taxa de exaustão de 4000 m^3/h (indicados em azul na parte superior da Figura 3a), representando uma taxa de renovação de ar de 10 trocas de ar por hora, valor comumente recomendado para os modelos comerciais. Para representar as fontes internas de calor, posicionaram-se 65 tornos mecânicos sobre o piso, com dimensões de 1,5 m x 0,5 m x 1,0 m, indicados pela malha de blocos em vermelho (5 x 13) na Figura 3b, com potência de 1,5 kW cada. Considerou-se uma única malha para o volume do galpão, de 160, 330, 24, em formato de paralelepípedo (12,5 x 12,5 x 25 cm) e tempo de simulação de 1800 segundos, determinado a partir da análise da estabilidade da repetição dos vórtices de turbulência de forma visual, e de forma que apresentasse uma resolução adequada para visualização dos vetores de velocidade do ar. A condição inicial de temperatura do ar interior foi de 35°C, considerando uma temperatura limite para IBUTG superior a uma atividade metabólica de 100 W (Brasil, 2022a), e temperatura do ar exterior de 20°C, que seria uma condição típica de meia estação para uma temperatura do ar exterior na Região Metropolitana de São Paulo no período da manhã.

Os cenários para análise do comportamento da movimentação do ar no interior da edificação foram: (C1) Sem a geração de calor interno; (C2) Com geração de calor interno, considerando uma emissão de 1,5 W/m^2 na superfície superior dos blocos; (C3) Com variação da geometria das janelas, de 2,0 m x 4,0 m (altura x largura) para 4,0 m x 2,0 m, mantendo o peitoril de 1,5 m, sem

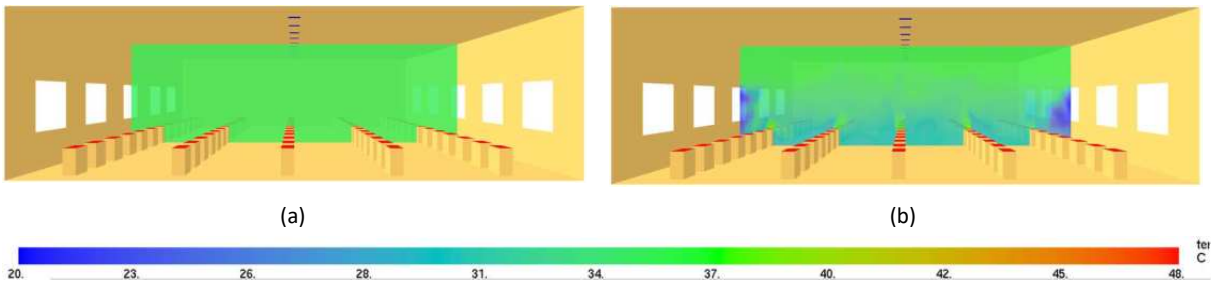
a geração de calor interno; (C4) Com variação da geometria das janelas, de 2,0 m x 4,0 m (altura x largura) para 4,0 m x 2,0 m, mantendo o peitoril de 1,5 m, com a geração de calor interno;

Para visualização dos fluxos de ar, foram gerados cortes transversais (x = 20 m) e longitudinais (y = 10 m; z = 1,75 m) com parâmetros de velocidade do ar e temperatura do ar e verificados o comportamento desses parâmetros ao longo do tempo. A operação dos exaustores eólicos a foi considerada a uma vazão constante, proporcionando a entrada de ar externo pelas janelas laterais a uma temperatura de 20°C.

Resultados

Na situação inicial (t = 0 s), o ar encontra-se parado a uma temperatura do ar a 35°C (Figura 4a). À medida que os exaustores eólicos atuam, observa-se um fluxo de ar entrando pela janela a 20°C, que desce e se desloca em baixa velocidade contornando os obstáculos até iniciar uma trajetória ascendente decorrente do sistema de exaustão (Figura 4b). Ao longo do tempo, o ar vai sendo resfriado, porém sempre ocorre um gradiente de temperatura.

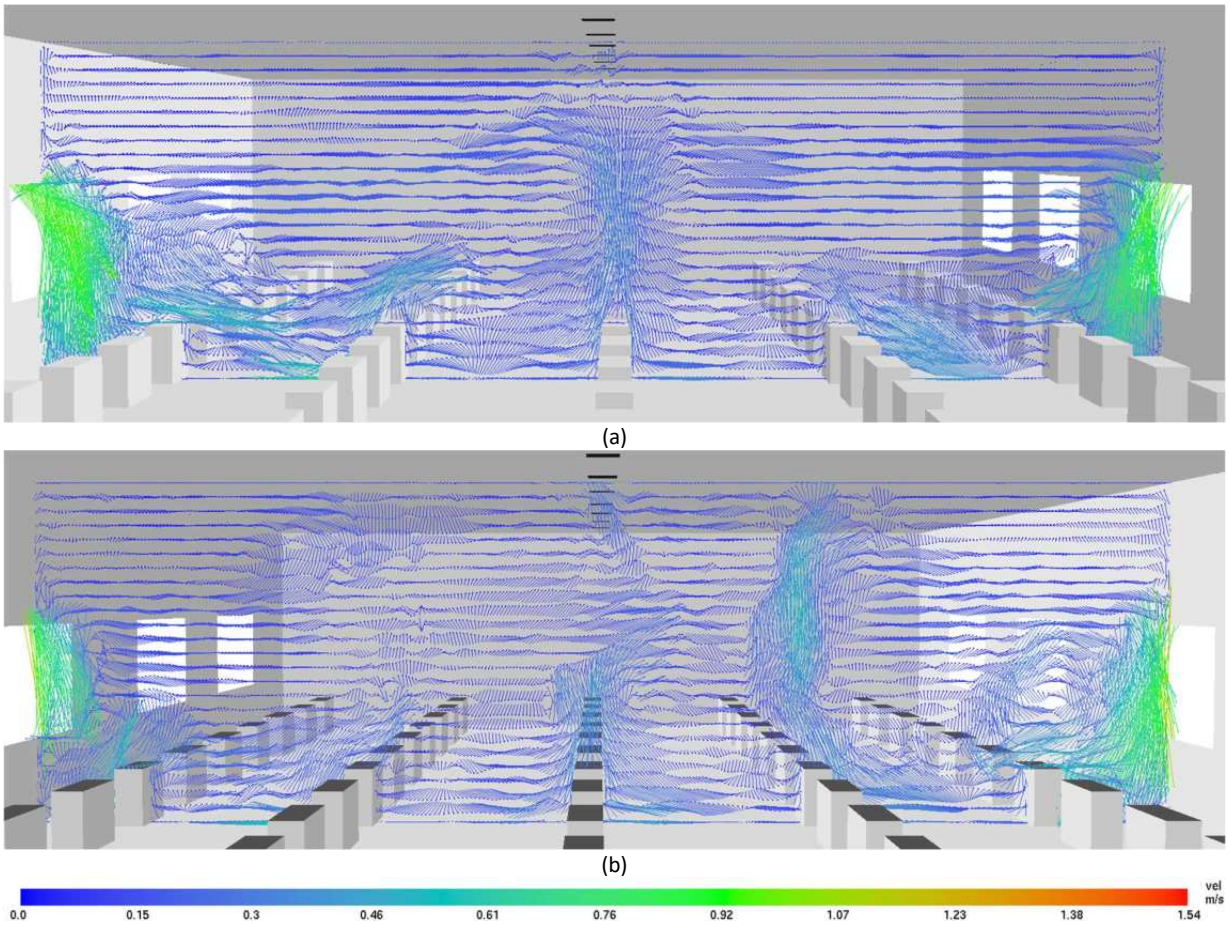
Figura 4: Corte transversal indicando temperatura do ar em C2 no instante (a) t = 0 s; e (b) t = 120 s.



Perfis de velocidade do ar

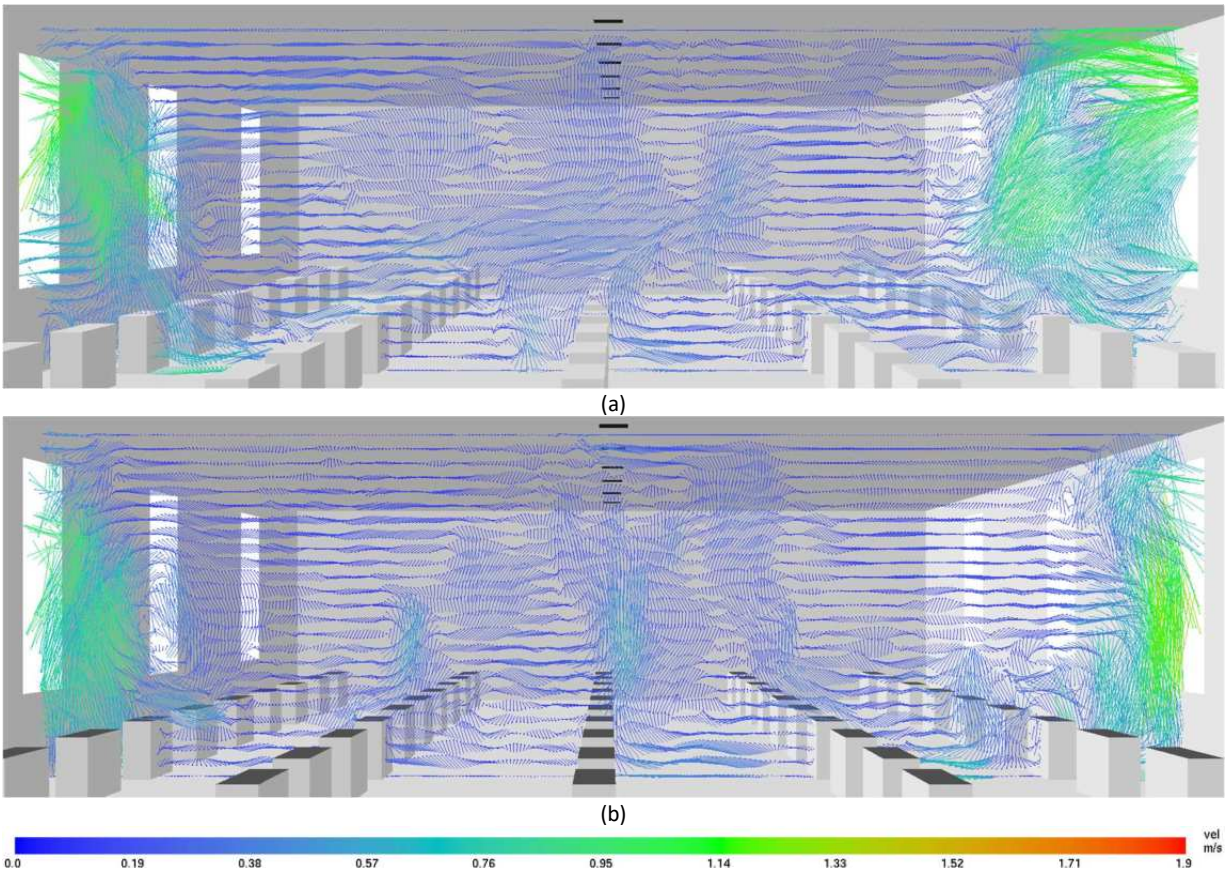
Analisando o corte transversal com vetores de velocidade do ar (Figura 5a), os cenários com e sem a geração de calor interno apresentam velocidades do ar de 0,5 m/s a 0,8 m/s na entrada da janela, e um fluxo ascendente em direção aos exaustores eólicos. No entanto, no cenário C2 (Figura 5b), as plumas térmicas direcionam o fluxo de ar, aumentando a velocidade do ar sobre as máquinas. Em ambas situações, a maior parte apresenta uma velocidade do ar predominante de 0,2 m/s, que não causa desconforto devido à turbulência (ASHRAE, 2023).

Figura 5: Corte transversal indicando vetores de velocidade do ar (a) C1, sem fonte interna de calor e (b) C2, com fonte interna de calor



Já nos cenários com as janelas altas, C3 e C4 (Figura 6), notam-se velocidades do ar mais elevadas, sobretudo no fluxo de ar de entrada pela janela em todo o pé-direito. No cenário C3 (Figura 6a), a velocidade do ar próxima à cobertura é maior, enquanto que no C4 (Figura 6b), este efeito é menor em função da presença das fontes de calor. O formato das janelas afeta a ventilação, mesmo que mantida a mesma proporção de porcentagem de aberturas em relação ao piso, pois verificou-se que o estreitamento da largura da janela proporcionou um aumento da vazão de entrada.

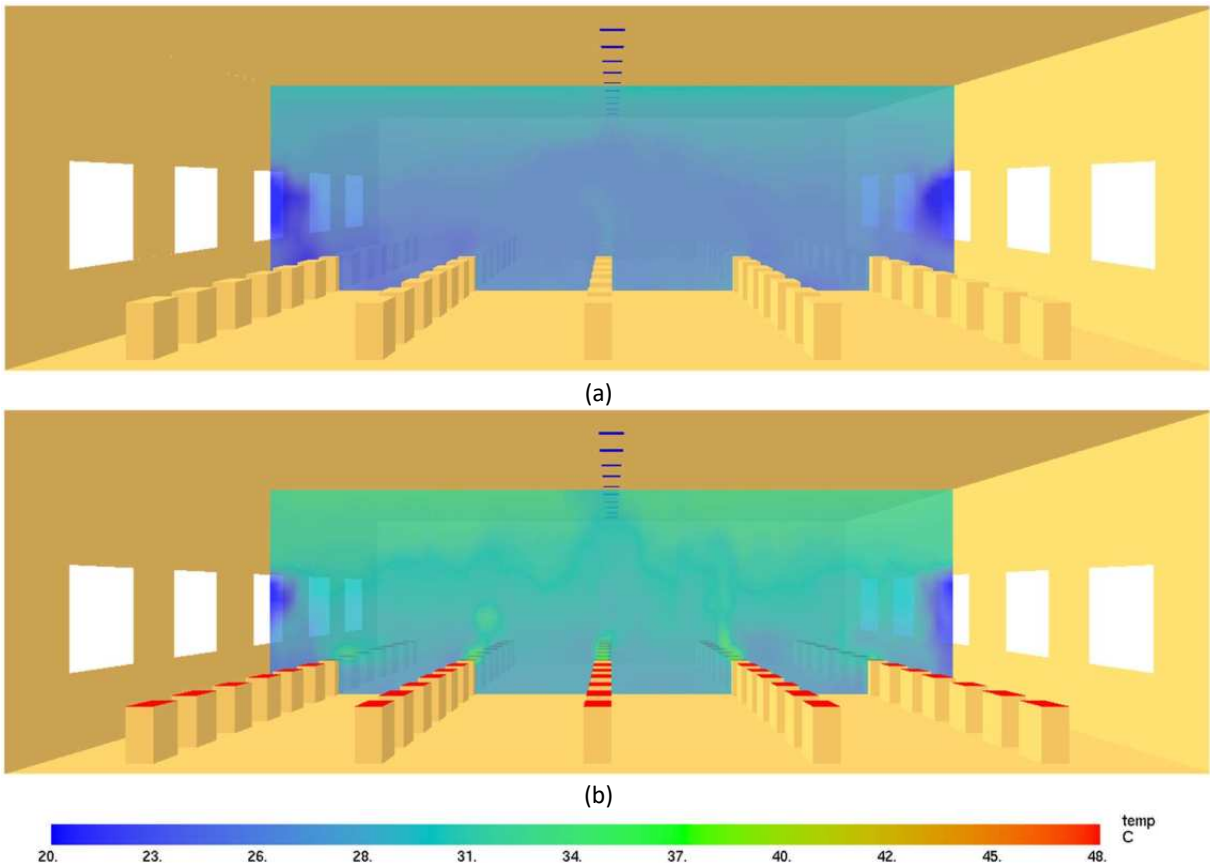
Figura 6: Corte transversal indicando vetores de velocidade do ar (a) C3, sem fonte interna de calor e (b) C4, com fonte interna de calor



Perfis de temperatura do ar

A Figura 7 mostra o perfil de temperatura do ar no corte transversal dos casos C1 e C2, aproximadamente no instante 1800 segundos. No cenário sem as fontes de calor interna (C1) (Figura 7a), a temperatura do ar é mantida próxima à temperatura de conforto na zona ocupada, entre 23 °C e 26 °C, predominando o tom azulado na escala de cores, enquanto que no cenário C2 (Figura 7b), predomina o tom esverdeado, com a formação de plumas térmicas. A NR-15 estabelece a faixa de temperatura do ar entre 18 °C e 25 °C para conforto térmico em ambientes climatizados (Brasil, 2022a). Em ambientes ventilados naturalmente, o limite superior de temperatura para conforto poderia ser até maior.

Figura 7: Corte transversal indicando temperatura do ar (a) sem fontes de calor e (b) com fontes de calor



A Figura 8 mostra o corte longitudinal no sentido horizontal, a uma altura de 1,70 m, correspondente à altura da cabeça de uma pessoa de pé. Na Figura 8a, que corresponde ao cenário C1, destaca-se em preto a temperatura do ar predominante de 25,5°C, enquanto que na Figura 8b, referente ao cenário C2, a temperatura predominante é de 29°C.

Considerando os cenários C3 e C4 (Figura 9), observa-se que ocorre uma redução da temperatura do ar na área próxima à cobertura, com um gradiente menor de temperatura. Na zona ocupada, no entanto, a temperatura do ar apresenta um perfil semelhante aos cenários C1 e C2, respectivamente. Na altura de 1,70 m, a temperatura do ar predominante no cenário C4 é de 28,6°C a 28,8°C, portanto muito próximo aos 29°C verificados no cenário C2.

Figura 8: Corte longitudinal horizontal (h = 1,75 m) indicando temperatura do ar nos cenários (a) C1, sem fontes de calor e (b) C2, com fontes de calor

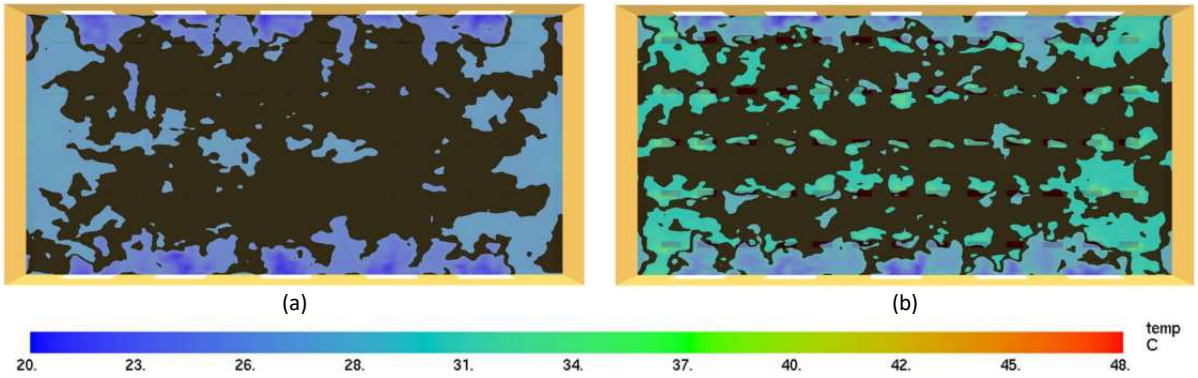
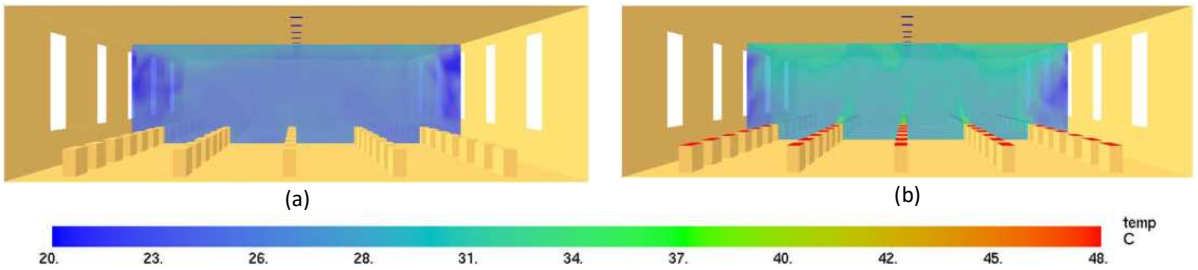


Figura 9: Corte transversal indicando temperatura do ar com a alteração da geometria da janela nos cenários (a) C3, sem fontes de calor e (b) C4, com fontes de calor



O modelo utilizando neste trabalho apresenta dimensões que o caracterizam como de pequeno porte, com geração moderada de calor. A atividade metabólica esperada para este tipo de edificação pode ser considerada de trabalho moderado com um braço (BRASIL, 2022a). Aproximando o IBUTG à temperatura de bulbo seco, uma vez que o galpão possui pé direito alto e os ocupantes estão mais distantes do efeito da temperatura radiante média, o limite de exposição ocupacional ao calor aos trabalhadores é de 30,3°C. Nos cenários considerados para simulação, a temperatura predominante máxima verificada na altura de 1,75 m é de 29°C, portanto inferior ao valor de IBUTG da NR-15. A NR-17, por sua vez, determina que deve ser mantida a temperatura de 18 a 25°C em ambientes climatizados. No caso de locais com ventilação natural, a norma ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2023) propõe o modelo adaptativo para ambientes naturalmente ventilados e estipula o intervalo de temperatura de acordo com a temperatura do ar externo. Considerando o clima de São Paulo, o intervalo de temperatura operativa ao longo do ano varia de 17,6°C a 24,6°C até 20,5°C a 27,5°C (Suzuki, 2022). Isto significa

que mesmo nos períodos mais quentes, a temperatura operativa máxima para conforto é de 27,5°C. Assim, para os cenários com fonte de calor interna, mesmo com exaustores eólicos, seria possível garantir a níveis adequados de salubridade para evitar o estresse térmico, e não o conforto térmico. Medidas como incremento da quantidade de exaustores, aumento da área de abertura vertical, alteração de geometria do espaço e seleção mais criteriosa de materiais na envoltória, sobretudo nas fachadas mais críticas e na cobertura, poderiam ser consideradas em um processo de otimização para redução da temperatura do ar na zona ocupada.

Conclusões

Em edificações industriais, as alternativas para evitar a sobrecarga térmica e a renovação do ar do ambiente é por meio da ventilação natural, ou da ventilação forçada considerando dispositivos de baixo consumo energético. Este artigo propôs o uso de exaustores eólicos em galpão industrial, por meio de fluidodinâmica computacional, para verificação das condições mínimas de trabalho para a exposição ao calor. A partir de uma planta genérica, com condições típicas de galpão industrial do estado de São Paulo, analisaram-se os fluxos de ar, alterando os parâmetros de presença/ausência de fonte de calor interna e geometria das janelas. Os resultados indicaram que os exaustores eólicos são eficientes na remoção da carga térmica, uma vez que garantem uma taxa de ventilação constante, ao passo que a ventilação natural poderia não ser suficiente. No entanto, proporcionam níveis adequados para salubridade e não para conforto térmico, de até 32,5°C na zona ocupada na presença de fontes de calor, que corresponde ao limite de IBUTG para uma atividade metabólica de 126 W, de trabalho leve com as mãos. A alteração da geometria da janela proporcionou um aumento da vazão de entrada de ar, mas não foi suficiente para reduzir a temperatura do ar na zona ocupada. O estudo na fase de projeto e a verificação dos detalhes por meio da simulação em CFD são importantes para prevenir problemas futuros de insalubridade e desconforto térmico em edifícios industriais.

Referências

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ANSI/ASHRAE Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 15: Atividades e operações insalubres**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2022a.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 17: Ergonomia**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2022b.

BRASIL, Rene Porfirio Camponez do. **Utilização de exaustores eólicos no controle da temperatura e da ventilação em ambiente protegido**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004. DOI: https://doi.org/10.11606/T.11.2004.tde-25042005-170200

CAMARGOS, Bruno Henrique Lourenço et al. Medidas atenuantes à exposição ocupacional acima do limite de IBUTG em galpões industriais. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas: Unicamp, v. 15, jan. 2024, p. e024002. DOI: https://doi.org/10.20396/parc.v15i00.8672111

DIADEMA (Município). **Lei Complementar N° 59, de 23 de agosto de 1996**. Diadema: Câmara Municipal, [1996]. Disponível em: https://www.cmdiadema.sp.gov.br/legislacao/leis_integra.php?chave=10046419. Acesso em: 27 mar. 2025.

Exaustão Ambiental Arujá. 2025. Disponível em: https://aeracaoambiental.com.br/cuidados-na-instalacao-de-um-exaustor-eolico/. Acesso em 15 abr. 2025.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Fire Dynamics Simulator User's Guide.** NIST Special Publication 1019. Gaithersburg: NIST, 2024, 524 p. http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019

PU, Jing; YUAN, Yanping; JIANG, Fujian; ZHENG, Kaijie; ZHAO, Kaiming. "Buoyancy-driven natural ventilation characteristics of thermal corridors in industrial buildings". **Journal of Building Engineering**, v. 50, 2022, p. 104107. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104107

SUZUKI, Eliane Hayashi. **Processo de tomada de decisão para otimização em conforto térmico e eficiência energética integrando janelas inteligentes e ventilação híbrida nos climas subtropical e tropical**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2022.

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. **LEED v4.1 Building Design and Construction**: Getting started guide for beta participants. USGBC, 2023.

Ventcenter. Exaustor Eólico. 2018. Disponível em: https://www.ventcenter.com.br/exaustor-eolico.php. Acesso em: 15 Abr. 2025.