XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE GALPÕES INDUSTRIAIS DOTADOS DE FONTE INTERNA GERADORA DE CALOR DE ALTA INTENSIDADE

Bruno H. L. Camargos (1); Henor A. de Souza (1); Adriano P. Gomes (2); Luma de S. Dias (1)
(1) Eng. Civ., Mestrando; Eng. Mec., Professor; Eng. Civ., Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Morro do Cruzeiro, s/n°, Ouro Preto – MG – Brasil, CEP 35400-000, Tel.: (37)99149-1951; (31)3559-1533 Ramal 1482; (31)98568-8679, E-mail: brunolourencocamargos@gmail.com; henorster@gmail.com; lumadias_mtpo@hotmail.com
(2) Arq., D.Sc., CODADES, Instituto Federal de Minas Gerais, Rua Pandiá Calógeras, 898, Campus Ouro Preto, Ouro Preto – MG – Brasil, CEP 35400-000, Tel.: (31)3559-2277, E-mail: adriano.gomes@ifmg.edu.br

RESUMO
A busca por melhores condições de trabalho e pela qualidade de vida nos ambientes laborais traz, em primeiro plano, benefícios diretos para a saúde do trabalhador e, em segundo plano, modificação no seu rendimento e produtividade. Juntamente a isso, a otimização do desempenho energético de edifícios industriais raramente esteve no foco das pesquisas devido ao grande consumo de energia dos processos de produção industrial. Neste trabalho faz-se uma análise do desempenho térmico via simulação numérica de galpões industriais dotados de fonte interna geradora de calor de alta intensidade visando-se aferir as condições de conforto higrotérmico internas. Estuda-se, para a cidade de Belo Horizonte, a influência de algumas configurações de sistemas de fechamento considerando-se ainda os efeitos da ventilação natural em função da posição das aberturas de entrada de ar e da presença do lanternim. Os resultados finais mostram que a seleção de materiais com menores valores de absortância aplicados ao fechamento metálico da edificação diminuem a temperatura interna em até 1,8°C frente a outros materiais e o bom condicionamento da ventilação natural se mostra indispensável, uma vez que, com a presença do lanternim obtém-se uma diminuição de até 11,9°C da temperatura interna do galpão. Compara-se os resultados encontrados com os limites do índice IBUTG previstos pela NR-15. Essa avaliação da exposição ocupacional ao calor é estendida para cidades com cenários climáticos diferentes de Belo Horizonte – MG sendo essas, respectivamente, Curitiba – PR e Manaus – AM. Para ambas as cidades, tratando-se estritamente do dia mais quente de verão, obteve-se um índice IBUTG elevado, mesmo com a interpolação da melhor configuração para o galpão, sendo necessário, em suma, a implementação de medidas de controle para o exercício das atividades laborais neste ambiente industrial.
Palavras-chave: materiais de construção, desempenho térmico, galpão industrial, *EnergyPlus*, IBUTG.

ABSTRACT
The search for better working conditions and the life quality at workplaces brings, in a first plane, direct benefits to the worker health and, secondarily, a change in their income and productivity. Alongside this, the energy performance optimization of industrial buildings has rarely been the focus of research, due to the high energy consumption of industrial production processes. In this work, an evaluation of the thermal performance through numerical simulation of industrial sheds, equipped with an internal high-intensity heat source, to verify internal hygrothermal comfort conditions, is performed. The influence of some configurations of closure systems is considered for the city of Belo Horizonte considering the effects of natural ventilation as a function of the position of the air intake openings and the presence of the ridge vent. The final results show that the selection of materials with lower values of absorptance applied to the metallic closure of the building decreases the internal temperature by up to 1.8°C compared to other materials, and the good conditioning of the natural ventilation was indispensable, since with the presence of the ridge vent, a reduction of up to 11.9°C of the internal temperature of the shed is obtained. Compare the results found with the limits of the IBUTG index predicted by the NR-15. This evaluation of the occupational exposure to heat is extended to cities with different climatic scenarios of Belo Horizonte – MG these being, respectively, Curitiba – PR and Manaus – AM. For both cities, strictly on the hottest summer day, a high IBUTG index

was obtained, even with the interpolation of the best configuration for the shed, being necessary, in short, the implementation of control measures for the exercise of labor activities in this industrial environment.
Keywords: construction materials, thermal performance, industrial shed, *EnergyPlus*, WBGT.

1. INTRODUÇÃO

Condições inóspitas, de calor ou umidade, especialmente nos ambientes laborais, faz com que o corpo humano trabalhe sob estresse, o que estabelece necessariamente a este, gerar ou perder calor a fim de se manter em equilíbrio térmico. Em condições de desconforto térmico, têm-se a redução da produtividade dos trabalhadores, aumento das sensações de mal-estar e de possíveis problemas de saúde (LACCHINI, 2010).

O trabalho em um ambiente desconfortável termicamente, especialmente em ambientes quentes, além do desconforto geral causado pelo esforço do coração que baterá mais rapidamente e do aumento da circulação do sangue, tem-se que as pessoas podem sentir náuseas, enjoos e até desmaiar, sintomas esses que são indicativos da necessidade de se suspender o trabalho. Em alguns casos esses sintomas podem não ser tão óbvios e os indivíduos podem não perceber o estresse a que estão sendo submetidos, o que aumentará substancialmente o risco de acidentes (SCIGLIANO; HOLLO, 2001).

O estresse térmico é definido como o resultado de condições microclimáticas desfavoráveis que requerem a intervenção do sistema termorregulador, uma vez que, para o bom funcionamento do organismo humano, a temperatura do corpo deverá ser mantida em torno de 37°C.

Com o intuito de melhorar as condições térmicas dos ambientes laborais, em alguns casos, torna-se inevitável a implementação de equipamentos condicionadores, especialmente, em locais equipados com fonte interna geradora de calor de alta magnitude. Uma das alternativas à implementação de sistemas mecânicos de condicionamento do ambiente está em propiciar condições internas favoráveis como resultado da ventilação natural, essa que é 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. No caso da construção de galpões industriais, sobretudo naqueles equipados com fontes internas geradoras de calor, é usual a construção de aberturas nas coberturas (lanternins), além daquelas aberturas nas fachadas, a fim de se obter iluminação natural e também melhorar a ventilação natural (MAZON, 2005; LACCHINI, 2010).

Ao tratar de edifícios industriais comumente denominados de galpões, têm-se que, especialmente no Brasil, dá-se pouca ou nenhuma observância à fase de planejamento e concepção arquitetônica, principalmente quanto ao condicionamento térmico natural, tal como, constata-se frequentemente a situação de temperaturas elevadas no interior desses, gerando desconforto térmico quase que permanentemente aos ocupantes, e isso, é devido mais à má concepção, adequação e escolha dos materiais e técnicas de construção, do que propriamente ao clima (TINÔCO, 2001; MAZON, 2005).

Neste artigo apresenta-se técnicas de modificação do ambiente térmico por meio da alteração dos materiais de construção constituintes da envoltória do galpão e do condicionamento da ventilação natural a partir do modelo computacional. Dessa maneira, pretende-se levantar um estudo comparativo entre os resultados coletados por meio de simulações, como forma de melhorar as condições ambientais internas de galpões industriais, ou de edificações de grande porte.

1.1. Desempenho Térmico de Edificações Industriais

Atualmente, um grande avanço no mercado da construção civil é a utilização de sistema de construção que reduz o consumo de material e de energia antes e após a sua instalação. Os materiais de construção têm uma forte influência sobre as condições de conforto do ambiente interno de uma edificação. Quando especificados corretamente podem evitar ganhos térmicos excessivos, obtendo-se melhorias nas condições ambientais internas (ROAF; FUENTES; THIMAS, 2006).

Os materiais constituintes da edificação influenciarão diretamente no conforto térmico dos usuários do ambiente construído, em virtude que esses regulam o seu desempenho térmico. A verificação do desempenho térmico quanto ao fechamento da edificação perpassa a avaliação dos componentes de construção específicos, a saber: a perda de calor por janelas e paredes, a existência ou não de isolamentos térmicos, a infiltração de ar, dentre outros aspectos (CORBELLA; YANNAS, 2003).

Em se tratando de eficiência energética de edificações, percebe-se que essa está diretamente relacionada aos ganhos ou perdas de calor pela envoltória da edificação, que, associados à carga interna gerada pela ocupação, pelo uso de equipamentos e pela iluminação artificial, podem resultar no consumo dos sistemas de condicionamento de ar, além dos próprios sistemas de iluminação e equipamentos.

Este artigo está fundamentado na modificação dos materiais de construção aplicados a um modelo de

tipologia industrial, onde é adotada a restrição das variações aos materiais que compõem os fechamentos verticais e a cobertura, bem como é proposta a aplicação de isolamento térmico nessas superfícies.

1.2. Importância da Ventilação Natural: O emprego de lanternins

Em linhas gerais, ventilar é trocar o ar de um recinto fechado seja por meios naturais, quando recebe o nome de ventilação natural, ou induzida por equipamentos mecânicos, nomeada ventilação forçada.

O propósito do bom condicionamento da ventilação nas edificações visa a manutenção de um ambiente interno saudável e confortável, em suma, visa preservar a qualidade do ar no interior de um ambiente. O deslocamento natural do ar faz-se através de aberturas (janelas, exaustores, lanternins, etc.), em que essas, seja como entrada ou saída do ar, devem estar devidamente posicionadas de forma a proporcionar um fluxo de ar adequado no recinto. Nos galpões industriais, o uso da ventilação natural tem por finalidade controlar a temperatura, a distribuição do ar, a umidade e eliminar agentes poluidores do ambiente como gases, vapores, poeiras, fumos, névoa, microrganismos e odores.

2. OBJETIVO

Avaliar o desempenho térmico de galpões industriais dotados de fonte interna geradora de calor de alta intensidade a fim de caracterizar o perfil de temperatura interna em função da configuração de alguns sistemas de fechamento da envoltória, da posição das aberturas e da presença de lanternins, considerando a condição climática das cidades de Belo Horizonte – MG, Curitiba – PR e Manaus – AM.

3. MÉTODO

A metodologia de investigação utilizada é a realização de variações paramétricas com o uso da ferramenta de simulação computacional *EnergyPlus* a partir de um modelo geométrico base.

As atividades deste artigo são ordenadas da seguinte maneira: a) definição dos materiais de fechamento e cobertura; número e dimensionamento das aberturas de entrada de ar e do lanternim do modelo base; b) definição de um modelo geométrico representativo de um galpão industrial; c) determinação dos parâmetros físicos a alterar no modelo; d) simulação parametrizada das variáveis utilizando-se o módulo *AirflowNetwork* do programa computacional *EnergyPlus* e por fim, e) avaliação dos resultados e confronto com os limites estabelecidos na norma regulamentadora NR-15 (BRASIL, 1978) que prevê o índice IBUTG.

3.1. Informações Gerais sobre o Galpão Industrial

Pretende-se estudar um galpão industrial equipado com uma fonte interna geradora de calor por meio de um modelo geométrico, situado no contexto climático da região de Belo Horizonte (Tabela 1). Partindo desse pressuposto e baseado nos materiais comumente encontrados na região dessa cidade, bem como na disponibilidade e acessibilidade no comércio, encontra-se na Tabela 2 os materiais de construção constituintes da envoltória do galpão industrial (modelo base). Na Tabela 3 encontra-se informado a listagem das informações adicionais relativas à caracterização das cargas térmicas internas desta edificação industrial. Inclui-se também as regiões de Curitiba e Manaus, mostrando-se aqui somente os resultados na comparação do índice IBUTG.

Considerando que os funcionários deste ambiente industrial realizam atividades moderadas, é assumido, uma taxa de batimentos cardíacos e o consumo de oxigênio, como o apresentado pela norma ISO 8996 (ISO, 2004) gerando uma taxa de atividade metabólica (MET) de aproximadamente 175W por pessoa, referente ao exercício com máquina ou bancada, com alguma movimentação (LBNL, 2018). Também para o estudo em questão, são consideradas as vestimentas típicas para verão e inverno, com uma resistência térmica média de 1clo ou 0,155m^2°C/W, segundo a norma ISO 7730 (ISO, 2005), uma vez que é comum o uso de uniformes nos locais de trabalho (Tabela 3). Quanto às cargas térmicas internas assumidas neste artigo (Tabela 3) tem-se, segundo Neufert (2006), que a ocupação média de um ambiente industrial com trabalho de produção e transformação de peças é de uma pessoa para cada 70m², gerando assim, uma ocupação de 45 funcionários para a área de 3000m² do galpão aqui analisado. Além disso, propõe-se como cotidiano industrial para esta edificação 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, será assumido nas simulações a presença de uma fonte geradora de calor com potência nominal de 1MW situada no interior do galpão industrial (Tabela 3). Já quanto à carga térmica interna devido a iluminação artificial, especifica-se que, para ambientes onde se desenvolvem tarefas “severas moderadamente críticas e prolongadas com detalhes

médios" um nível necessário de iluminação artificial de 300 a 750lux. Adotando para o galpão em estudo 500 luxes pode-se inferir que a potência dissipada para o ambiente resulta aproximadamente igual a 30W/m² (MACINTYRE, 1990). Logo, tem-se que o calor gerado pela iluminação artificial no interior do galpão resulta em: 89.938,8W (Tabela 3).

Tabela 1 – Localização geográfica das cidades simuladas.

UF	Zona Bioclimática	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)
PR	ZB1	Curitiba	25,5S	49,2W	940
MG	ZB3	Belo Horizonte	19,93S	43,93W	850
AM	ZB8	Manaus	3,1S	60,0W	67

Fonte: NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Tabela 2 – Características termofísicas e absortância dos materiais de construção do galpão industrial (Modelo Base).

Material	Rugosidade	Espessura (cm)	Condutividade κ (W/m.K)	Densidade ρ (kg/m³)	Calor Específico c (J/kg.K)	Absortância		
						α_t Térmica	α_s Solar	α_v Visível
Parede de alvenaria (até 3 metros de altura)								
Bloco de concreto furado	Médio rugoso	20,0	0,57	1040,0	830,0	0,90	0,60	0,60
Argamassa de Reboco	Médio rugoso	2,0	0,72	1860,0	830,0	0,90	0,50	0,50
Piso								
Concreto	Rugoso	10,0	1,75	2400,0	1000,0	0,90	0,70	0,70
Cobertura, Fechamento metálico e Lanternim								
Chapa em aço galvanizada	Liso	0,002	55,0	7800,0	460,0	0,90	0,25	0,25

Fonte: Adaptado de NBR 15220-2 (ABNT, 2005); UFRGS, 2007.

Tabela 3 – Cargas térmicas assumidas para o galpão industrial.

Fonte interna geradora de calor (W)	Iluminação (W)	Pessoas (W)
1.000.000,0	89.939,8	7875,0

3.2. Modelo Geométrico Proposto

A avaliação do desempenho térmico é feita considerando-se um modelo de galpão industrial com 3000m² (tendo por dimensões de base 30m de largura x 100m de comprimento). Sua forma é composta por um prisma retangular com fechamento superior por cobertura com planos inclinados. A altura do volume varia de 9m na parte mais baixa até 13,50m no trecho da cumeeira, gerando um volume de ar de aproximadamente 33.000m³. O dimensionamento das aberturas de entrada e saída de ar são feitas conforme sugere Clezar e Nogueira (2009) resultando em uma vazão necessária de 122,13m³/s e 20 aberturas para entrada de ar, tendo cada uma 8,54m² e 42,69m² de área para saída de ar (aproximadamente 0,50m de altura para o lanternim); essa altura do lanternim é corrigida com os coeficientes redutores de área previstos no método IVN apresentado por Scigliano e Hollo (2001), obtendo um lanternim de 1,50m situado no topo da cumeeira do galpão ao longo de toda sua extensão. Isso se faz necessário, uma vez que todas as aberturas estão munidas de aparatos para permitir a entrada de luz e protegê-las contra a chuva. Tais informações encontram-se na Tabela 4.

O modelo geométrico do galpão industrial é desenhado com o auxílio do *plug-in Euclid* que é uma extensão gratuita para o *Sketch-Up* baseada na extensão do *Legacy OpenStudio* que permite a exportação do desenho a partir de coordenadas geométricas, salvando este no formato *.idf*, que é compatível com o *software EnergyPlus*. Para este estudo, leva-se em consideração a simulação de um ambiente de trabalho industrial. Entende-se como uma área típica de trabalho nessa tipologia um ambiente de grandes dimensões e sem divisão física entre os postos de trabalho. Portanto, tratando-se de um local sem obstruções e composto de uma massa de ar homogênea, define-se uma única zona térmica para cálculo. Na Figura 1 mostra-se o modelo geométrico do galpão industrial, bem como tem-se os detalhes do lanternim e abertura munido das venezianas industriais.

Tabela 4 – Tamanho das aberturas de entrada de ar e lanternim.

Vazão (m³/s)	Área de entrada de ar (m²)	Área de saída de ar (m²)	Altura corrigida do lanternim (m)
122,13	85,40	42,69	1,50

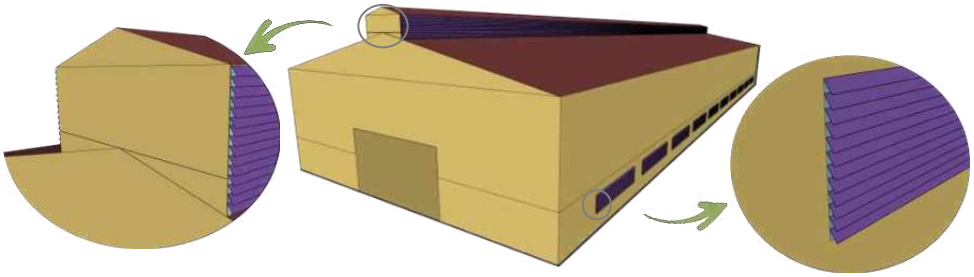


Figura 1 – Modelo geométrico do galpão industrial e detalhes do lanternim e da abertura com venezianas industriais.

3.3. Abordagem Numérica

O *EnergyPlus* (versão 8.7.0) é um *software* de simulação de carga térmica e análise energética, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, baseado em outros dois *softwares* antecessores, o BLAST e o DOE-2 (DOE, 2018). A partir da versão 1.3.0 do programa, o modelo de cálculo do fluxo de ar passou a ser nomeado de *AirflowNetwork*. Nesse objeto, o cálculo do fluxo de ar acontece entre as zonas e o exterior das frestas e das aberturas levando-se em consideração as características do entorno da edificação, as condições de abertura das janelas e portas e as condições de ventilação.

Os coeficientes de pressão são calculados automaticamente pelo programa, uma vez que, trata-se de uma edificação com geometria retangular, condição essa limitante para tal. As simulações são configuradas para se realizar com a situação de ventilação constante e fator de abertura 1 (100%) para todas as aberturas de entrada de ar e lanternim, sendo os portões considerados sempre fechados (fator de abertura 0). Devido à utilização dos aparatos de entrada de luz e proteção contra chuva, do tipo venezianas industriais, presentes em todas as aberturas, o coeficiente de vazão de cada área fora igual a 0,40 conforme recomenda Idel'cik (1969) *apud* Clezar e Nogueira (2009).

O método de inicialização linear é escolhido, pois se adequa à simulação de ventilação por efeito chaminé e tende a estabelecer uma direção adequada para o fluxo de ar durante a simulação. Nele, os valores iniciais para fluxo mássico (m) são obtidos por uma aproximação linear, relacionando fluxo de ar com a queda de pressão (Equação 1):

$$\text{ɱ} = C_i \rho \left(\frac{\Delta p}{\mu}\right) \qquad \text{Equação 1}$$

onde: ɱ é a vazão mássica (kg/s); C_i é o coeficiente de fluxo mássico (m^3); ρ é a densidade do ar (kg/m^3); Δp é a diferença de pressão entre dois nós considerados (Pa) e μ é a viscosidade do ar (Pa.s).

3.4. Avaliação da Exposição Ocupacional ao Calor

Neste artigo avalia-se as condições de trabalho em um ambiente industrial sujeito a temperaturas extremas. Entende-se por temperaturas extremas aquelas que provocam sérios riscos à saúde do trabalhador.

A Norma Regulamentadora de Segurança e Higiene do Trabalho NR-15, de 08 de junho de 1978, em seu anexo 03, prevê o Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo – IBUTG (Equação 2), como padrão técnico legal brasileiro para a avalição das condições de trabalho em ambientes sob temperaturas elevadas. Esse índice combina a temperatura de bulbo úmido natural (ambiente naturalmente ventilado), T_{BU}, e a temperatura de globo, T_G, da seguinte forma:

$$\text{IBUTG} = 0{,}7T_{BU} + 0{,}3T_G \qquad \text{Equação 2}$$

T_{BU} é a temperatura mais baixa que pode ser alcançada apenas pela evaporação da água. É um tipo de medida de temperatura que reflete as propriedades físicas de um sistema constituído pela evaporação da água no ar. O índice IBUTG tem a função de simular a pele do trabalhador, molhada pelo suor; já a T_G é a temperatura de um local, eficaz para diversas finalidades, sendo a maioria para fins de controle da temperatura do meio. Ambas as temperaturas citadas anteriormente não são *outputs* possíveis de serem obtidos diretamente pelo *software* de simulação termoenergética, por isso, essas temperaturas são obtidas a partir das relações que seguem.

A temperatura de globo é obtida a partir da temperatura radiante média (T_{RM}) que é a temperatura de uma circunvizinhança para eliminar o efeito da reflexão, com a qual um corpo troca à mesma quantidade de energia que no ambiente considerado. Quando um globo com d = 0,15m e ε = 0,95 é usado, tem-se a Equação 3.

$$T_{RM} = \sqrt[4]{(T_G + 273)^4 + 2{,}5.10^8.v^{0,6}.(T_G - T_{BS})} - 273 \quad \text{Equação 3}$$

onde: T_{RM} é a temperatura radiante média (°C); v é a velocidade do ar (m/s); T_G é a temperatura de globo (°C) e T_{BS} é a temperatura de bulbo seco (°C).

Já a temperatura de bulbo úmido é obtida de maneira iterativa, conhecendo-se a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa de um determinado ponto de estado. Nesse caso, a temperatura de bulbo seco é progressivamente decrementada, mantendo-se constante o valor de entalpia, até se alcançar um ponto de estado cujo valor de umidade relativa seja igual ou bem próximo a 100%.

3.5. Período de Simulação

Para as simulações numéricas horárias do galpão industrial, são utilizados os dados climáticos do tipo TRY das cidades de Curitiba (ZB1), Belo Horizonte (ZB3) e Manaus (ZB8) disponíveis no site do programa *EnergyPlus* (LBNL, 2018). De acordo com tais arquivos climáticos anuais, considerando somente o período de verão (condição atenuante para o aumento do perfil da temperatura interna no interior da edificação analisada), as temperaturas máximas de bulbo seco para as respectivas cidades foram registradas nos dias: 09/dez. (32,2°C), 24/set. (34,8°C) e 30/set. (37,0°C). Dessa maneira, todas as simulações numéricas são realizadas para tais dias durante as 24 horas assumidas como sendo o funcionamento das atividades laborais desta edificação industrial.

4. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio das simulações numéricas para a cidade de Belo Horizonte – MG (ZB3). Os primeiros resultados avaliam a influência do bom condicionamento da ventilação natural para a diminuição da temperatura interna; em seguida são apresentados os resultados obtidos avaliando-se a influência de algumas configurações de sistemas de fechamento para a edificação.

4.1. Influência da Presença do Lanternim

Na Figura 2 apresenta-se o resultado da temperatura de bulbo seco (T_{BS}) interna e externa para a situação do galpão industrial dotado de uma fonte interna geradora de calor de alta intensidade sem lanternim em relação e também para o mesmo galpão equipado com o lanternim de 1,50m conforme obtido na etapa de dimensionamento.

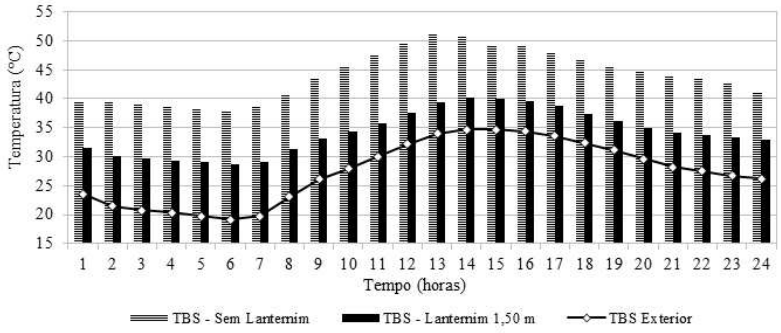


Figura 2 – Influência da presença do lanternim na diminuição do gradiente térmico interno do galpão industrial.

Observa-se que o perfil de temperatura interna do galpão em função da presença do lanternim é drasticamente reduzido em relação ao galpão sem este. Nesse caso, em comparação ao maior pico de temperatura desse dia típico (13hs), houve uma redução de 11,9°C comprovando a extrema necessidade da presença do lanternim e da importância do bom condicionamento da ventilação natural em edificações deste tipo.

4.2. Influência da Posição das Aberturas de Entrada de Ar

As aberturas de entrada de ar são dimensionadas conforme recomenda Clezar e Nogueira (2009) e estão localizadas a 1,20m do piso no modelo base. Visando analisar a influência da posição das aberturas de entrada de ar em relação a diminuição do perfil de temperatura interna do galpão fez-se a simulação numérica com estas situadas também a 4,0m de altura do piso.

Observa-se, pelos resultados obtidos, conforme mostrado na Figura 3, que as aberturas localizadas numa altura mediana da fachada (4m) prejudicam o efeito chaminé, esse que é um fator importante para uma eficiente ventilação natural, e isso contribui diretamente para o aumento da temperatura interna do galpão em

até 0,5ºC. Com esta posição de abertura para a entrada do ar, pode ocorrer ainda desconforto local para velocidades mais elevadas.

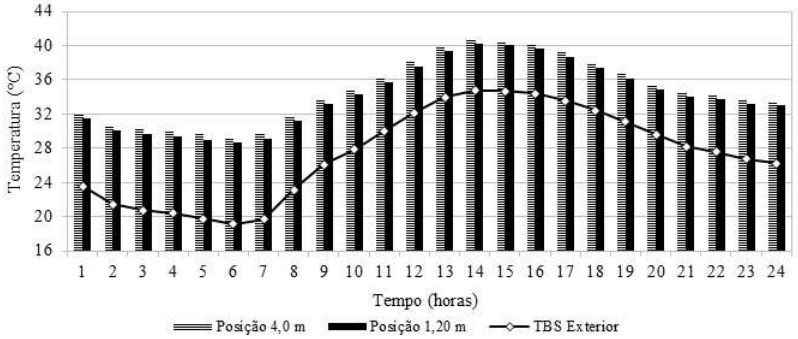


Figura 3 – Influência da posição das aberturas de entrada de ar na diminuição do gradiente térmico interno do galpão industrial.

4.3. Influência dos Materiais de Construção do Fechamento da Envoltória da Edificação

Neste subitem apresenta-se uma seleção de técnicas de modificação dos materiais de construção, como forma de alterar as condições térmicas do modelo industrial proposto. As modificações são divididas entre alterações realizadas nos fechamentos verticais, na cobertura, fechamento metálico lateral (incluindo lanternim) e na inserção de isolamentos térmicos. A partir da divisão das técnicas, são descritas listas de materiais de construção a alterar no modelo base proposto para simulação e análise dos resultados.

4.3.1 Fechamento vertical – parede de alvenaria

Baseado nos materiais comumente utilizados na região climática de Belo Horizonte, bem como disponíveis ou acessíveis no comércio, formula-se uma listagem de materiais de construção a serem utilizados nos elementos de fechamento verticais conforme mostrado na Tabela 5, sendo restrito aos primeiros 3m de altura da parede, a fim de avaliar a influência destes no desempenho térmico do galpão (Figura 4).

Tabela 5 – Características termofísicas dos materiais de construção da parede de alvenaria.

Material	**Rugosidade**	**Espessura (cm)**	**Condutividade κ (W/m.K)**	**Densidade ρ (kg/m³)**	**Calor Específico c (J/kg.K)**	**Absortância**		
						α_t Térmica	**α_s Solar**	**α_v Visível**
Parede de alvenaria (até 3 m de altura)								
Tijolo furado	Médio rugoso	10,0	0,51	1121,0	830,0	0,90	0,70	0,70
Tijolo comum	Médio rugoso	20,0	0,72	1922,0	920,0	0,90	0,70	0,70
Bloco concreto celular	Médio rugoso	20,0	0,15	510,0	1008,0	0,90	0,60	0,60
Concreto leve	Médio rugoso	10,0	0,33	640,0	1000,0	0,90	0,65	0,65
Chapa em aço galvanizada	Liso	0,002	55,0	7800,0	460,0	0,90	0,25	0,25

Fonte: Adaptado de NBR 15220-2 (ABNT, 2005); UFRGS, 2007.

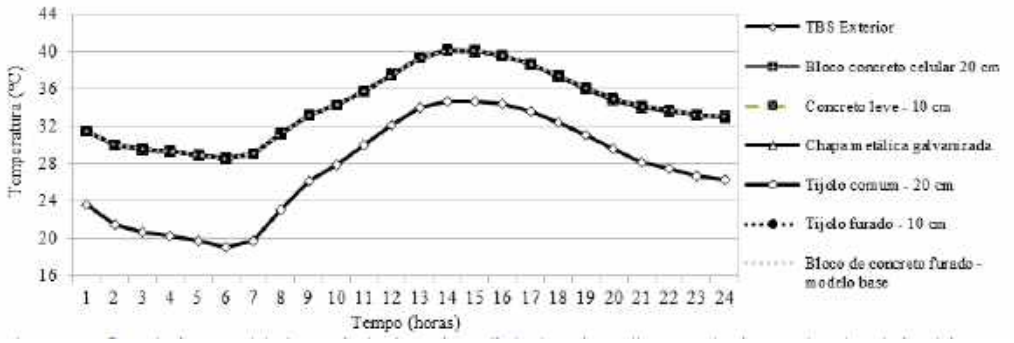


Figura 4 – Influência dos materiais da parede de alvenaria na diminuição do gradiente térmico interno do galpão industrial.

Observa-se, pelos resultados mostrados na Figura 4, que a mudança dos materiais (Tabela 5), como esperado, pouco afeta a alteração do perfil de temperatura interna do galpão industrial, uma vez que, frente ao pé direito do galpão tais mudanças são insignificantes.

4.3.2 Fechamento metálico lateral, cobertura e lanternim

Baseado nos materiais comumente utilizados na região climática de Belo Horizonte, bem como disponíveis ou acessíveis no comércio, formula-se uma listagem de materiais de construção utilizados nos elementos

para os fechamentos metálicos laterais, cobertura e lanternim, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Características termofísicas dos materiais de construção do fechamento vertical, cobertura e lanternim.

Material	Rugosidade	Espessura (cm)	Condutividade κ (W/m.K)	Densidade ρ (kg/m³)	Calor Específico c (J/kg.K)	Absortância		
						α_t Térmica	α_s Solar	α_v Visível
Fechamento Metálico Lateral, Cobertura e Lanternim								
Fibrocimento	Muito rugoso	0,005	0,95	1900	840,0	0,90	0,70	0,70
Chapa metálica de alumínio	Liso	0,0016	230,0	2700,0	880,0	0,90	0,10	0,10
Telha dupla em alumínio com isolamento*	Médio rugoso	5,0	0,035	35,0	1420,0	0,90	0,30	0,30
Zinco	Liso	0,002	112	7100,0	380,0	0,90	0,40	0,40
Cobre	Liso	0,002	380	8900,0	380,0	0,90	0,40	0,40

*Características termofísicas do isolamento, em poliestireno de 5 cm, e do alumínio. Soma-se duas camadas, superior e inferior, de alumínio.
Fonte: Adaptado de NBR 15220-2 (ABNT, 2005); UFRGS, 2007.

Na figura 5 tem-se os resultados obtidos da variação dos materiais utilizados no sistema de fechamento lateral e superior do galpão industrial. Analisando os resultados, percebe-se que o perfil de temperatura interna utilizando-se a chapa metálica de alumínio é o mais ameno encontrado diminuindo a temperatura interna em 0,4°C frente ao uso da chapa metálica de aço galvanizada, presente no modelo base; e diminuindo cerca de 1,8°C em relação ao maior pico de temperatura interna, aplicando-se tal fechamento com fibrocimento. Acredita-se que o sistema de fechamento com a chapa metálica de alumínio apresenta o melhor desempenho, propiciando as menores temperaturas internas nos horários de pico da temperatura externa, uma vez que esse material possui os menores valores de absortância em relação aos demais materiais, fator esse que, pode aumentar ou reduzir a energia térmica absorvida pelo mesmo por meio da radiação e de fato influenciar o desempenho térmico do sistema de fechamento da edificação.

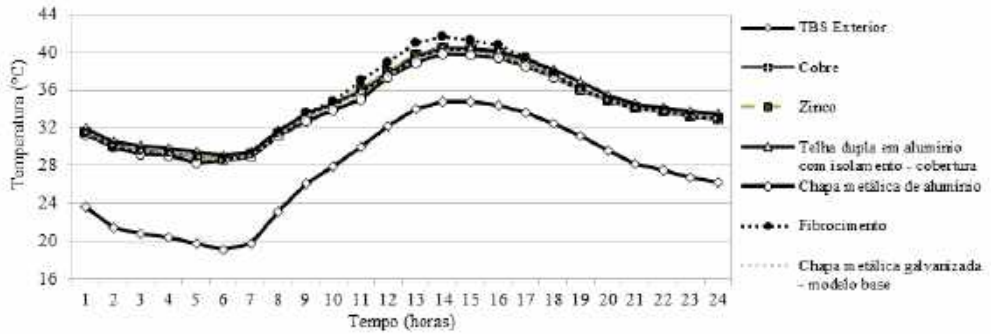


Figura 5 – Influência dos materiais do fechamento metálico na diminuição do gradiente térmico interno do galpão industrial.

4.3.3 Sobre o isolamento térmico

Na tabela 7 tem-se a listagem dos materiais de construção utilizados na formação de camadas isolantes térmicas nesta análise. Considera-se a utilização de isolantes térmicos nos elementos verticais e na cobertura, situação usual em determinados usos industriais.

Analisando os resultados mostrados na Figura 6 verifica-se que os menores picos de temperatura interna são obtidos no sistema de fechamento sem a inserção de isolantes térmicos para o galpão industrial obtendo uma diferença térmica de até 0,9°C em função da presentes desses. De maneira geral, percebe-se para o caso do galpão aqui estudado, que com a presença de isolantes térmicos no fechamento da edificação, tem-se um aumento da temperatura interna do galpão, e isso acontece pois considera-se nestas simulações a presença de uma fonte interna geradora de calor de alta intensidade e somado ao fato de que materiais isolantes térmicos possuem menor condutividade térmica (W/m.K) e menor densidade (kg/m^3) que materiais comuns, tendem a contribuir para a elevação do perfil de temperatura interna do galpão.

Tabela 7 – Características termofísicas dos materiais de construção para isolamento térmico.

Material	Rugosidade	Espessura (cm)	Condutividade κ (W/m.K)	Densidade ρ (kg/m³)	Calor Específico c (J/kg.K)	Absortância		
						α_t Térmica	α_s Solar	α_v Visível
Fechamento Metálico Lateral e Cobertura								
Lã de rocha	Médio rugoso	5,0	0,045	100,0	750,0	0,90	0,40	0,40
Lã de vidro	Médio rugoso	5,0	0,045	50,0	700,0	0,90	0,40	0,40

Poliestireno extrudado	Médio rugoso	5,0	0,035	35,0	1420,0	0,90	0,30	0,30
Gesso	Médio liso	3,0	0,35	1000,0	840,0	0,90	0,25	0,25
Espuma rígida de poliuretano	Médio rugoso	5,0	0,030	35,0	1670,0	0,90	0,40	0,40

Fonte: Adaptado de NBR 15220-2 (ABNT, 2005); UFRGS, 2007.

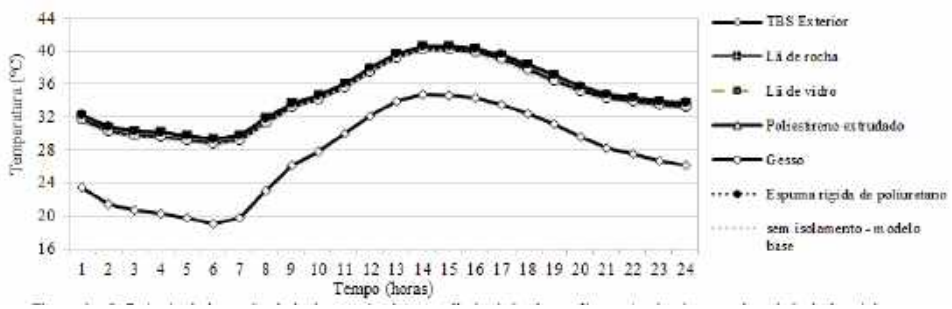


Figura 6 – Influência da inserção de isolantes térmicos na diminuição do gradiente térmico interno do galpão industrial.

4.4. Avaliação e Controle de Ambientes Quentes

Munido do melhor resultado encontrado mediante as configurações de sistemas de fechamento e aberturas adotadas para o galpão industrial aqui analisado, presente na Tabela 8, e visando confrontar tal valor de temperatura interna com os limites e recomendações do índice IBUTG estabelecidos na norma NR-15 (BRASIL, 1978) fez-se novamente a simulação computacional extraindo como *outputs* as variáveis: temperatura de bulbo seco (T_{BS}), temperatura radiante média (T_{RM}) e umidade relativa (UR); objetivando encontrar a temperatura de globo (T_G) (a partir da Equação 3) e a temperatura de bulbo úmido (T_{BU}) para posterior aplicação na Equação 2.

Tabela 8 – Melhor configuração do sistema de fechamento e posição das aberturas do galpão industrial.

Parede de Alvenaria	**Fechamento metálico vertical, cobertura e lanternim**	**Isolamento Térmico**	**Posição das aberturas de entrada de ar**
Bloco de concreto furado	Chapa metálica de alumínio	Sem isolamento	1,20m

Visando analisar de maneira mais abrangente o desempenho térmico do galpão industrial aqui estudado, avalia-se o índice IBUTG para cidades de zonas bioclimáticas diferentes do contexto climatológico de Belo Horizonte – clima mediano (ZB3), sendo essas: condição extrema de inverno – Curitiba (ZB1) e condição extrema de verão – Manaus (ZB8) (Tabela 1); ambas simulações são referentes aos horários mais críticos do dia extremo de verão de cada cidade. A metodologia de avaliação da exposição ocupacional ao calor é feita seguindo os pressupostos do Índice de Bulbo Úmido – Termômetro de Globo (IBUTG) a partir da média horária para o período analisado (Tabela 09).

Tabela 9 – Variáveis ambientais e IBUTG.

Cidade	**Horário**	**T_{BS} (°C)**	**T_{RM} (°C)**	**UR (%)**	**v (m/s)**	**T_G (°C)**	**T_{BU} (°C)**	**IBUTG (°C)**
Curitiba	13hs	37,1	34,4	52,8	1,6	36,4	28,6	**30,9**
Belo Horizonte	14hs	39,8	34,3	38,7	2,0	38,5	27,3	**30,6**
Manaus	16hs	41,5	35,7	46,3	1,4	39,9	30,7	**33,5**

Comparando com os limites de tolerância para a exposição ao calor segundo os quadros 2 e 3 da norma regulamentadora NR-15 (BRASIL, 1978), de acordo com os valores encontrados, deve-se adotar um regime de trabalho de 15min seguidos de 45min de descanso; sendo cabível ainda a adoção de medidas adequadas de controle para o exercício das atividades laborais, a saber: a instalação de climatizadores artificiais nos ambientes de longa permanência dos funcionários; controle da umidade do ar; exigir que se cumpram as pausas para recuperação, previstas na legislação; seleção adequada, do ponto de vista médico, seguido de acompanhamento, se possível, com monitoramento timpânico da temperatura do trabalhador; dentre algumas outras medidas críveis para adesão.

5. CONCLUSÕES

A tipologia arquitetônica do objeto de estudo possui características semelhantes à maioria das edificações do tipo galpão industrial da cidade de Belo Horizonte – MG: cobertura de telhas metálicas simples, aberturas para entrada de ar nas duas fachadas laterais e a presença de lanternim do tipo longitudinal ao longo da cumeeira da edificação. A partir dos resultados obtidos é possível verificar a importância da seleção adequada dos materiais constituintes do sistema de fechamento das edificações em geral, em especial, nas

edificações de grande porte e dotadas de fonte interna geradora de calor de alta intensidade, tal qual o objeto de estudo deste artigo. Como mostrado nos resultados, nesse caso, o aumento no perfil da temperatura interna pode chegar a 1,8°C em si tratando do fechamento metálico do galpão industrial e de até 0,9°C ao aplicar-se camadas isolantes ao fechamento. Ressalta-se também, a importância do bom condicionamento da ventilação natural proporcionada pelas aberturas de entrada de ar e presença do lanternim, sendo esse último, responsável pela diminuição de 11,9°C do gradiente térmico interno deste galpão industrial, provando ser indispensável a sua existência em edificações dotadas de fonte interna geradora de calor, uma vez que, a fonte interna tende a contribuir para a intensificação do efeito chaminé acentuando a vazão natural do ar quente presente no interior da edificação através do lanternim.

Neste tipo de edificação o material da cobertura, do fechamento metálico lateral e os ganhos térmicos deles advindos são fatores determinantes para a condição térmica interior. A telha metálica possui elevada transmitância térmica, o que juntamente com a baixa renovação do ar interno junto a existência de uma fonte geradora de calor de alta intensidade, proporcionam elevadas temperaturas de bulbo seco no interior desta edificação, e nesta análise, soma-se a escolha do dia típico de verão com maior pico de temperatura de bulbo seco externa para a cidade analisada. Com isso, mesmo com a interpolação da melhor configuração para o sistema de fechamento e aberturas para ventilação encontrado, obteve-se um IBUTG alto para as três cidades analisadas, culminando necessariamente na adoção de medidas protetivas e de controle para a execução da jornada laboral neste ambiente industrial. Nota-se que a umidade relativa (UR) influencia diretamente no IBUTG, uma vez que T_{BU} é explicitamente dependente de UR, e no cálculo a T_{BU} representa 70% do valor. Dessa forma, mesmo apresentando o menor T_{BS}, a cidade de Curitiba (ZB1) denota o índice maior que a cidade de Belo Horizonte (ZB3). No entanto, o galpão analisado representa uma boa solução de construção, pois nestas condições climáticas extremas de verão e com a carga térmica interna adotada, nenhum tipo de estrutura, seja de aço ou alvenaria, possibilitaria que se atingisse condições de conforto térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, 2005. 92 p.

. NBR 15575: Edifícios habitacionais **–** Desempenho**.** Parte 1 – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013. 381 p.

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

BRASIL, NORMA REGULAMENTADORA **NR-15**, de 08 de julho de 1978. Atividades e Operações insalubres. 3 p.

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

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável**. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: Ed. Revan, 2003, 308 p.

DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Building energy software tools directory**. 2018. Disponível em: http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/alpha_list.cfm. Acesso em: 24 abr. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) – **ISO 7730:** Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. 3. ed. rev. [s.l.], 2005, 52 p.

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

LACCHINI, A. S. **Desempenho termoenergético de edificações industriais**. Orientador: Heitor da Costa Silva. 2010. 206 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Arquitetura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2010.

LBNL – LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. ***EnergyPlus*** **engineering reference**: The Reference to *EnergyPlus* Calculations, 2018.

MACINTYRE. A. J. **Ventilação industrial e controle da poluição**. 2. ed. rev., Rio de Janeiro: LTC, 1990, 403 p.

MAZON, A. A. O. **Ventilação natural em galpões utilizando lanternins**. Orientador: Henor Artur de Souza. 2005. 193 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

NEUFERT, E. **Arte de proyectar em arquitectura**. 14. ed. rev. Barcelona: Editora Gustavo Gili, SA, 2006, 580 p.

ROAF, S.; FUENTES, M.; THIMAS, S. **Ecohouse: A casa ambientalmente sustentável**. Porto Alegre: Bookman, 2006, 487 p.

SCIGLIANO, S.; HOLLO, V. **IVN - Índice de ventilação natural**. São Paulo: Pini, 2001, 279 p.

TINÔCO, I. F. F. Avicultura Industrial: Novos Conceitos de Materiais, Concepções e Técnicas Construtivas Disponíveis para Galpões Avícolas Brasileiros. **Rev. Bras. Cienc. Avic**, Campinas, v.3, n.1, p.01-26, jan. 2001.

UFRGS. **Dicionário de materiais do LAFRIG** – Arquivo *EnergyPlus* obtido junto ao Laboratório de Vapor e Refrigeração da faculdade de Engenharia Mecânica da UFRGS, 2007. Disponível em: http://www.mecanica.ufrgs.br/lafrig/downloads.htm. Acesso em: 14 set. 2018.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES e UFOP pelos recursos financeiros aplicados no projeto.