

DETERMINAÇÃO DE ESTRATÉGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM UM GALPÃO INDUSTRIAL POR MEIO DE SIMULAÇÕES TERMOENERGÉTICAS

Luís Carlos Kristiner – luisckristiner@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, ufrgs.br/demec

F2 – Qualidade Ambiental Interna

Resumo. Este estudo concentrou-se na avaliação de um pequeno galpão industrial localizado na cidade de Cruzeiro do Sul (RS), o qual relata-se não haver uma condição térmica adequada. Dessa forma, o objetivo principal foi melhorar o conforto térmico no interior do galpão, buscando proporcionar condições mais favoráveis para os usuários. Para isso, foram propostas modificações na envoltória e a definição de aberturas para ventilação natural. Testou-se ventilação cruzada e por efeito chaminé com aplicação de um lanternim. Estratégias como controle de venezianas e ventilação mecânica também foram avaliadas a partir do caso mais promissor. Os indicadores de conforto térmico foram obtidos pelo método PMV para todas as horas do ano. A análise, baseada em simulações termoenergéticas no EnergyPlus, revelou que intervenções como a aplicação de pintura branca nas superfícies externas e adição de isolamento térmico nas paredes e cobertura contribuíram para reduzir a variação térmica e aliviar o desconforto térmico. O controle parcial das venezianas contribuiu na redução das horas de desconforto de frio, enquanto a introdução de ventiladores mecânicos reduziu o desconforto térmico causado pelo calor. Comparando o cenário mais favorável, com 9,6% de horas de desconforto total, com a situação atual, observou-se uma redução significativa de 33,2%.

Palavras-chave: Conforto térmico, Ventilação natural, Simulação termoenergética, Qualidade do ar.

1. INTRODUÇÃO

Estudos de ventilação natural são pertinentes à aplicação sobre pavilhões industriais. Geralmente esses são ambientes de grande extensão e volume, alguns com altas fontes internas de geração de calor. Por essa causa, a climatização promovida passivamente por aberturas se trata de uma estratégia bastante aplicável para garantir um espaço mais confortável e de forma econômica.

Camargos (2019) avaliou, por meio de simulações no software EnergyPlus, o desempenho térmico de um galpão industrial situado em Belo Horizonte (MG) com fonte interna de calor de alta intensidade, com o foco de obter-se conforto térmico baseado no índice IBUTG previsto na norma NR-15. Para isso, focou-se na configuração ideal de ventilação natural e do uso de materiais adequados, sendo realizadas diversas simulações variando a altura e área das venezianas e do lanternim, a orientação quanto aos ventos e os materiais aplicados. No estudo foi percebido que, para o ambiente com fonte intensa de calor, o efeito chaminé de ventilação natural gera uma maior taxa de troca de ar, por isso um modelo com área maior de abertura do lanternim (saída do ar quente) apresentava valores melhores de temperatura interna e taxa de renovação do ar. Para o melhor caso simulado, obteve-se uma redução de até 9,2 °C da temperatura interna e uma porcentagem anual de horas de desconforto de 8,25% acima do limite do IBUTG. De forma similar, buscou-se analisar o caso deste estudo com a aplicação de um lanternim.

O presente estudo focou na análise de um galpão industrial de pequeno porte localizado na cidade de Cruzeiro do Sul (RS). É relatado que o ambiente não proporciona uma condição térmica adequada, ocorrendo períodos de muito calor e de muito frio. Atualmente seu uso é caseiro e esporádico, entretanto, no futuro há o interesse por parte do dono de reformá-lo para um uso comercial/industrial.

Dessa forma, o objetivo é garantir um ambiente com menor quantidade de horas de desconforto para seus usuários e, para isso, propõem-se mudanças sobre a envoltória atual do galpão, alterando materiais das fachadas e coberturas, inserindo aberturas para ventilação natural e outras estratégias. As análises baseiam-se em dados extraídos por meio de simulações termoenergéticas, e visam comparar o estado atual do galpão com cenários diferentes. Ressalta-se que a qualidade do ar interno, também influenciada pela ventilação natural, é discutida por meio da verificação da taxa mínima necessária de renovações de ar por hora.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo busca fundamentar a metodologia empregada, contextualizando os cálculos por detrás dos recursos aplicados. As análises foram desenvolvidas por meio de simulações termoenergéticas através do software EnergyPlus versão 8.7.0. A fim de facilitar a modelagem do galpão e suas aberturas, foi utilizado o SketchUp Make 2016 com o auxílio da extensão Euclid versão 0.9.3. Para a determinação do conforto térmico, optou-se pelo método PMV (*Predicted Mean Vote*) e se extraiu os indicadores para todas as horas do ano através da ferramenta online disponibilizada pela

Universidade de Berkeley (2023), CBE Thermal Comfort Tool, que compactua com as prescrições da norma ASHRAE 55.1 (2013).

2.1 EnergyPlus

EnergyPlus™ (2023) é um programa de simulação de energia para edificações, usado para modelar o consumo de energia, aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação, cargas elétricas e uso de água. Ele consiste em vários módulos que calculam a energia necessária para aquecer e resfriar o edifício, considerando diferentes sistemas e fontes de energia e simulando diversas condições ambientais e operacionais. EnergyPlus é de código aberto e é financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE).

Cálculo do balanço energético em zona térmica. De acordo com o guia de engenharia do EnergyPlus (EnergyPlus Engineering Reference, 2023), uma zona térmica se refere a um espaço contendo ar à mesma temperatura em todos os pontos, e para tal existe um sistema de controle térmico independente. O balanço de energia da zona térmica é definido a partir da equação 1, cujos termos estão em Watts.

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

Onde $C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de energia acumulada no ar da zona térmica, $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ é a soma das cargas interna convectivas, $\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ é a transferência de calor convectivo das superfícies, $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ é a transferência de calor devido à mistura de ar entre zonas, $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é a taxa de calor devido a infiltração de ar externo e \dot{Q}_{sys} é a energia fornecida pelo ar condicionado, sendo

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (2)$$

Temperatura Operativa. As análises apresentadas nos capítulos de Metodologia e Resultados são retratadas com o valor da temperatura operativa do galpão, a qual é definida a partir da temperatura média do ar na zona e a temperatura radiante média. A temperatura média interna do ar, conforme o documento InputOutput Reference (EnergyPlus, 2023), trata-se da média das temperaturas do ar ao longo do intervalo de tempo do sistema. Já a temperatura radiante média trata-se de uma média ponderada da área de superfície multiplicada pela emissividade das temperaturas internas das superfícies, onde a emissividade representa a capacidade de absorção térmica do material interno de cada superfície.

O Engineering Reference do Energy Plus (2023) apresenta o cálculo da temperatura operativa da seguinte forma, sendo o valor de γ tipicamente considerado como 0,5:

$$T_{op} = \gamma T_{radM} + (1 - \gamma) T_{intM} \quad (3)$$

Onde T_{op} a temperatura operativa da zona (°C), γ a fração radiativa (adimensional), T_{radM} a temperatura radiante média (°C) e T_{intM} a temperatura média do ar da zona (°C).

2.2 Método PMV

A norma ASHRAE 55.1 (2013) define conforto térmico como a condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico. Sobre ela é apresentado o voto médio previsto (PMV), que é um índice que prevê o valor médio das avaliações de sensação térmica de um grande grupo de pessoas em uma escala que varia de -3 a +3, correspondendo às categorias "frio," "fresco," "ligeiramente fresco," "neutro," "ligeiramente quente," "quente" e "muito quente".

O método PMV geralmente é aplicado para ambientes mecanicamente condicionados, enquanto para ambientes naturalmente ventilados é mais adequado o uso do Modelo Adaptativo, também apresentado na ASHRAE 55.1 (2013). Entretanto, as condições de projeto que serão apresentadas na seção 3, tais como taxa metabólica e nível de vestimentas, ultrapassam os limites aceitos pelo Modelo Adaptativo e, por isso, a análise foi feita por meio do PMV.

O PMV usa como parâmetros a temperatura média do ar, a temperatura radiante média, a taxa metabólica dos ocupantes, o isolamento da roupa, a velocidade do ar e a umidade relativa do ambiente. Assim, é determinado através de uma correlação que envolve o metabolismo das pessoas com a carga térmica atuante sobre elas (Wallauer, 2003), conforme é apresentado na equação 4.

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036.M) + 0,028] L \quad (4)$$

Onde M é a taxa metabólica e L é o termo de acumulação de energia, ambos em W/m².

Em conjunto ao PMV há o índice de Porcentagem Prevista de Insatisfeitos (PPD), que infere uma previsão quantitativa da porcentagem de pessoas termicamente insatisfeitas. A figura 1, obtida na norma ASHRAE 55 (2013), indica a relação entre os dois índices.

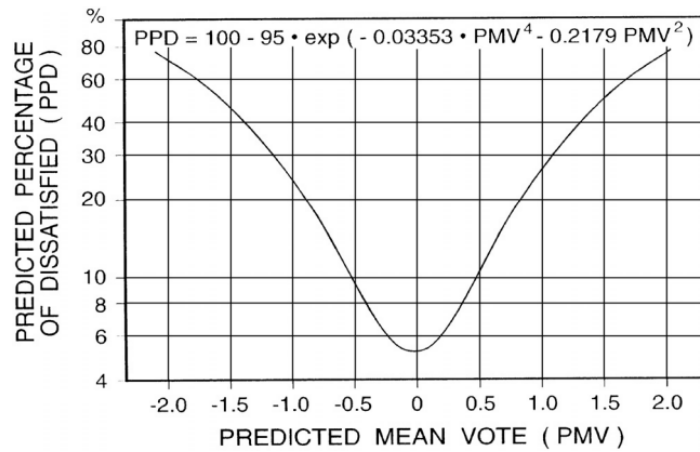


Figura 1. Percentual de PPD em função do PMV – ASHRAE 55, 2013

A faixa de PMV que abrange o valor aceitável de conforto térmico é entre -0,5 a 0,5. Já o PPD é aceitável até a porcentagem de 10% de insatisfeitos. Pela figura é percebido que para o melhor caso de PMV (zero) haverá ainda 5% de insatisfeitos pelo índice PPD.

3. CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

A seguir serão contextualizadas características do galpão, da sua região e de parâmetros de projeto definidos. Tais informações são pertinentes a execução das simulações termoenergéticas e da análise do PMV.

3.1 Caso de estudo

O galpão alvo do estudo é de pequeno porte. Possui 16 m de comprimento, 8 m de largura e sua cumeeira é de 7,5 m. Há dois portões metálicos, um com área de 14 m² e outro de 5 m², os quais foram considerados fechados para todas as simulações feitas. Não há aberturas de ventilação natural e as frestas não foram consideradas para a simulação inicial.

Localiza-se no interior do estado do Rio Grande do Sul, sobre uma região rural sem construções e vegetações próximas a nível de causar algum impacto sobre a simulação. A fachada frontal (portão menor) está orientada a 145° em relação ao norte geográfico.

Por fazer parte da mesma zona climática (ANSI/ASHRAE Standard 169, 2020) e ter latitude semelhante, o arquivo climático considerado mais adequado para o estudo refere-se à cidade de Rio Pardo (RS), que se distancia 61 km de Cruzeiro do Sul. A partir dessa fonte de dados, é possível obter informações sobre as propriedades e características do clima local para as 8760 horas do ano. Através do EnergyPlus foi possível verificar a variação da temperatura externa de bulbo seco ao longo do ano, conforme mostrado na Figura 2. Registrou-se 136 horas (1,55%) com temperatura acima de 32°C e 57 horas (0,65%) abaixo de 6°C. Dessa forma, percebe-se que a região apresenta anualmente uma considerável amplitude térmica, ou seja, com invernos e verões rigorosos.

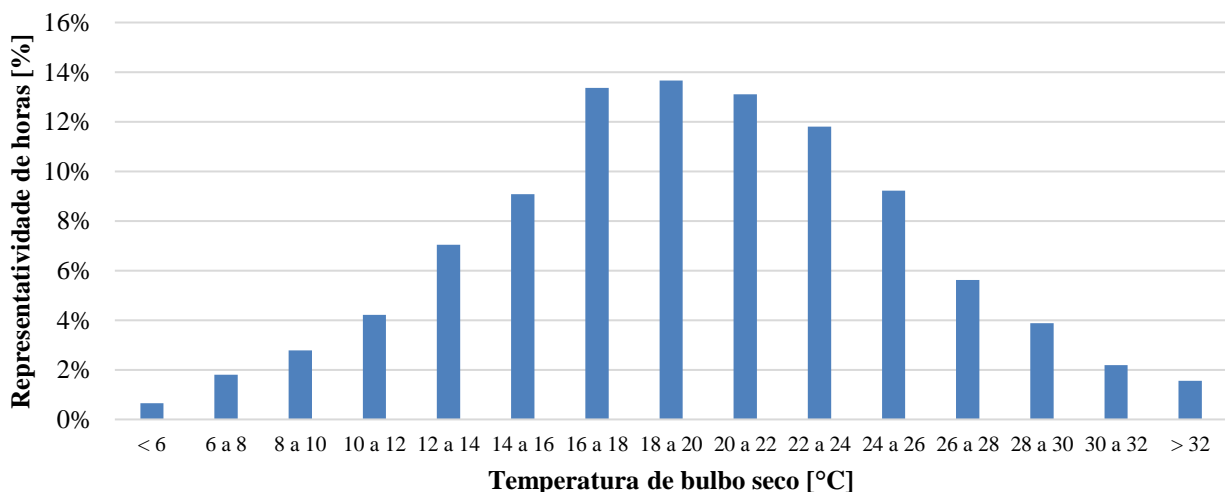


Figura 2. Temperatura de bulbo seco para todas as horas do ano em Rio Pardo.

3.2 Cargas internas

As cargas internas pertinentes ao projeto constituem-se na potência de iluminação interna, equipamentos internos, na ocupação de pessoas e na atividade metabólica delas. Essas foram programadas para estarem ativas entre 8 h e 17 h, horário comercial.

É assumido que as atividades prestadas sobre o galpão serão de uso leve de máquinas manuais, estimando assim, segundo valores apresentados na norma ASHRAE 55.1 (2013), uma taxa metabólica de 110 W/m² por pessoa. A conversão para W/pessoa é baseada na área de superfície média de pele de um ser humano adulto, dita como 1,8m² por Dubois (1916). O valor de iluminação interna foi obtido a partir da norma ASHRAE 90.1 (2010), enquanto os valores de potência de equipamentos internos e ocupação foram estimados baseados em informações cedidas pelo dono. O quadro a seguir apresenta os parâmetros de entrada de cargas internas.

Quadro 1. Resumo das cargas internas da simulação.

Carga interna	Valor
Iluminação interna	12,8 W/m ²
Equipamentos internos	2000 W
Ocupação	8 pessoas
Atividade metabólica	198 W/pessoa

3.3 Parâmetros de conforto térmico

Alguns dos parâmetros comentados na seção 2.2 para avaliação do conforto térmico pelo método PMV foram escolhidos, como o valor de Clo 0,5 para dias críticos de verão e Clo 1,25 para dias críticos de inverno, baseados na norma ASHRAE 55.1 2010 e mostrados no Quadro 2. A taxa metabólica, definida na seção 3.2, é convertida para 1,89 met.

Quadro 2: Descrição do isolamento das vestimentas (clo) para verão e inverno – ASHRAE 55.1, 2010.

Clo 0,50	Roupa íntima (0,04), meias (0,03), sapatos (0,02), manga curta leve (0,17) e calça grossa (0,24).
Clo 1,25	Roupa íntima (0,04), meias (0,03), botas (0,10), manga comprida (0,25), suéter leve (0,25), blusão grosso (0,34) e calça grossa (0,24).

A velocidade do vento interna foi considerada como 0,1 m/s, sendo permitido para aplicação do PMV, segundo a ASHRAE 55.1 (2010), a faixa entre 0,05 e 0,2 m/s. Já os valores de temperatura interna do ar, temperatura média radiante e umidade interna relativa foram obtidos através da simulação no EnergyPlus para todas as horas do ano no período comercial.

3.4 Taxa mínima de renovação

A partir da norma ASHRAE 62.1 (2016), calculou-se a taxa mínima de renovações (trocas) de ar por hora. Primeiramente é calculada a vazão de ar externo mínima, a qual se baseia no somatório da vazão requerida por pessoa multiplicada pelo número de ocupantes mais a vazão requerida por área multiplicada pela área de piso do ambiente, sendo parâmetros tabelados conforme o tipo de espaço interno. No estudo escolheu-se a definição de ambiente General manufacturing (fabricação geral), que estabelece 5 L/s por pessoa e 0,9 L/s por m². A partir de então, com base no volume do galpão calcula-se a taxa mínima de renovação de ar por hora. A tabela 1 resume o cálculo.

Tabela 1. Determinação da taxa mínima de renovação por hora.

Taxa de ar externo para pessoas		Taxa de ar externo para área		Vazão de ar externo mínima [L/s]	Volume da zona [m ³]	Taxa mínima de trocas de ar por hora [ren/h]
L/s por pessoa	Nº pessoas	L/s por m ²	Área de piso [m ²]			
5	8	0,9	128	155,2	864	0,65

A taxa de renovação de ar sempre deve estar acima desse valor calculado, pois senão pode comprometer a qualidade do ar interno e causar consequências de saúde aos ocupantes. Se as aberturas de ventilação natural não propiciarem esse atendimento, é sugerido a inserção de ventilação mecânica para introdução de ar externo no ambiente.

4. METODOLOGIA

A partir de um modelo base, representante das condições atuais do galpão conforme seção 3.1, foram feitas as propostas de alteração de envoltória. Além dos cenários com diferentes materiais, procurou-se definir a melhor configuração de aberturas para ventilação natural. Os gráficos e tabelas apresentados caracterizam o comportamento térmico do galpão por meio de sua temperatura operativa (T_{op}).

4.1 Simulação do cenário atual

A envoltória atual não dispõe de aberturas de ventilação natural e é composta apenas por chapas metálicas. Esse cenário é chamado de Caso 1. A figura 3 compara, para a semana de verão de projeto escolhida com base no dia mais quente do ano, o comportamento da temperatura operativa dentro do galpão e da temperatura externa. Já a figura 4 mostra o mesmo gráfico para a semana de inverno de projeto, definida a partir do arquivo climático. A semana de projeto trata-se de um período definido como típico e representativo para determinada estação.

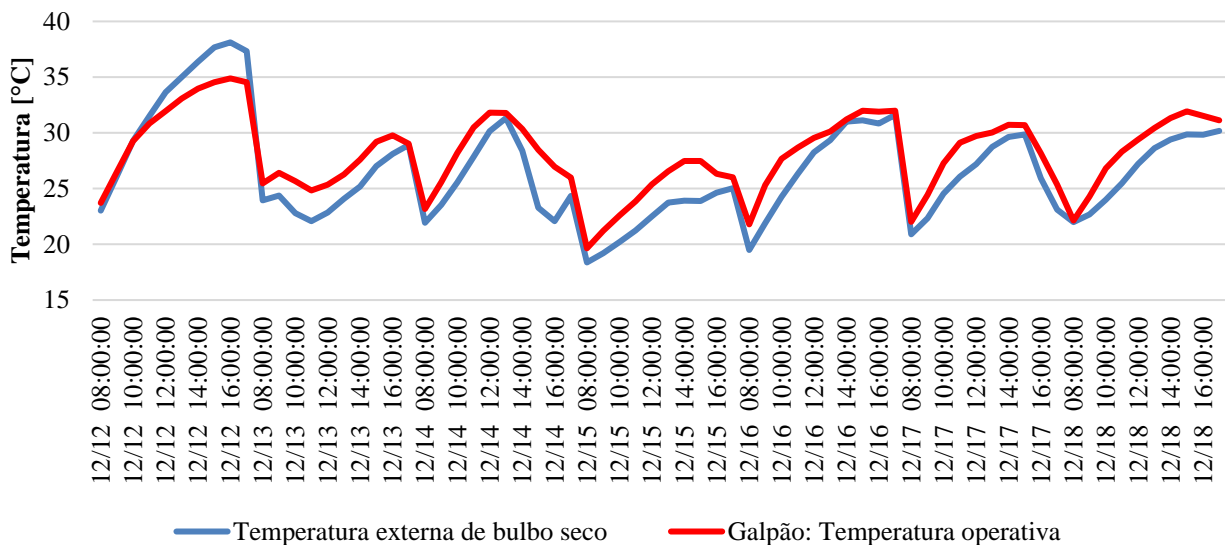


Figura 3. Comportamento da temperatura operativa no Caso 1 para semana típica de verão de projeto.

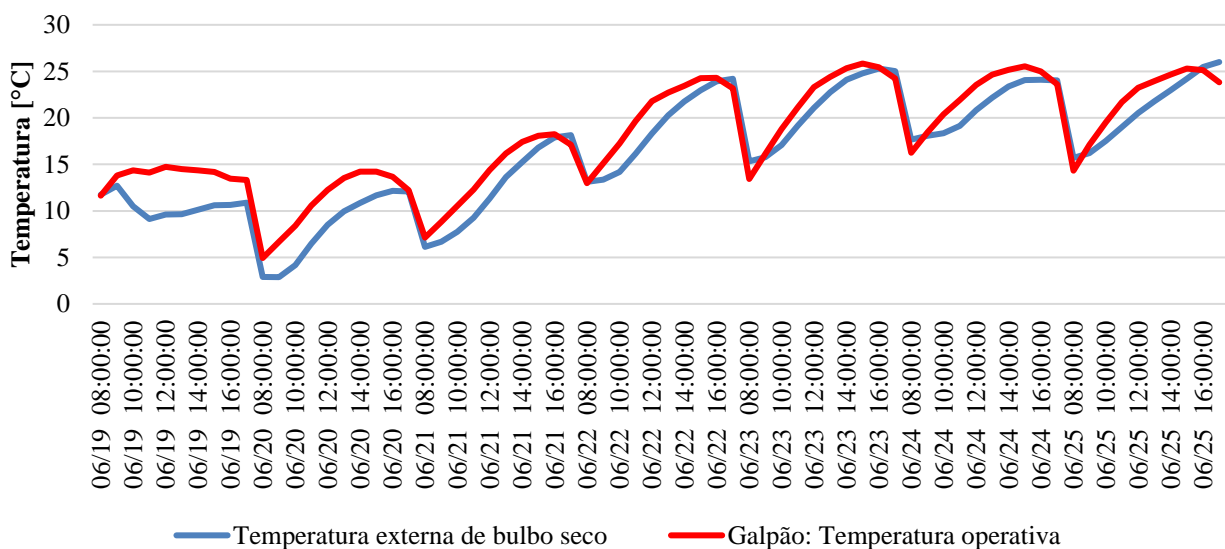


Figura 4. Comportamento da temperatura operativa no Caso 1 para semana típica de inverno de projeto.

A média da temperatura operativa na semana de verão de projeto foi de 28,1°C e seu pico máximo foi de 34,9°C. Percebe-se que maior parte do tempo ficou acima da temperatura externa, que apresentou média de 26,6°C. São temperaturas altas quando pensado em conforto térmico.

A média da temperatura operativa na semana de inverno de projeto foi de 17,9°C e seu pico mínimo foi de 4,9°C, enquanto a média da temperatura externa foi de 16,1°C. A temperatura mais elevada se deve ao ganho de calor, além das cargas internas, de sua envoltória.

Obtidos os parâmetros necessários mencionados na Seção 3.3, foram extraídos os índices de PMV para todas as horas do ano, sendo evidenciado um total de 1117 horas não atendidas, equivalente a 42,8% de horas de desconforto em regime de trabalho. Dessas, 36,8% são devidas ao calor e 6,0% são devidas ao frio. Trata-se de um valor esperado, uma vez que há bastante absorção de calor por meio da envoltória metálica e não isolada.

4.2 Construções propostas

A fim de ter uma melhor definição de envoltória, foram feitas simulações para diferentes casos, alterando a construção existente através da aplicação de pintura branca e isolantes térmicos nas paredes e cobertura. Essa análise se baseou em telhas metálicas trapezoidais de espessura de 0.5mm na configuração “sanduíche” com PIR (Poliisocianurato) de 50mm, o qual, além de permitir o isolamento da temperatura, fornece maior resistência ao fogo e altas temperaturas (SULFIBRA, 2023). Além disso, a pintura na cor branca das telhas metálicas tem o intuito de diminuir o ganho de calor pelas fachadas, reduzindo a absorvidade solar de 0,4 para 0,2, segundo valores vistos em Lamberts, et all (2016). A tabela 2 indica os quatro casos de construções testados.

Tabela 2. Cenários de construção testados.

Superfície	CASO 1: construção atual	CASO 2: pintura branca	CASO 3: pintura branca e isolamento PIR na cobertura	CASO 4: pintura branca e isolamento PIR na cobertura e paredes
Paredes	Telha trapezoidal (cor metálica)	Telha trapezoidal (pint. branca)	Telha trapezoidal (pint. branca)	Telha trapezoidal (pint. branca) com isolamento PIR
Cobertura	Telha trapezoidal (cor metálica)	Telha trapezoidal (pint. branca)	Telha trapezoidal (pint. branca) com isolamento PIR	Telha trapezoidal (pint. branca) com isolamento PIR
Piso	Concreto	Concreto	Concreto	Concreto

4.3 Avaliação da área de abertura

Segundo a seção 6.4 da norma ASHRAE 62.1 (2016), a área mínima efetiva de abertura para ventilação natural deve ser 4% da área de piso da zona, ou seja, 5,12 m² para o caso estudado. Trata-se de uma fração conveniente a ser respeitada, uma vez que o Código de Obras de Porto Alegre (LEIS MUNICIPAIS, 2023), por exemplo, indica que para esse tipo de ambiente deve haver uma abertura mínima de 1/20 da área de piso. Além disso, a norma estabelece, entre outras prescrições, que aberturas em fachadas opostas devem ter um distanciamento de no máximo cinco vezes a altura da zona, requisito que é atendido pelas condições do galpão para qualquer que seja a disposição das aberturas.

No EnergyPlus, a ventilação natural foi configurada por meio do grupo *AirFlowNetwork*, caracterizando as aberturas com o componente *SimpleOpening*. Mantendo a área constante de 5,12m², foram realizados testes sobre o modelo geométrico. Concluiu-se que a envoltória mais adequada é a com aberturas altas em todas as fachadas, pois apresentava média de renovação muito semelhante as demais, em torno de 8ren/h, porém com menor número de horas não atendidas pela taxa mínima de renovação de ar por hora. A figura 5 mostra o modelo escolhido.

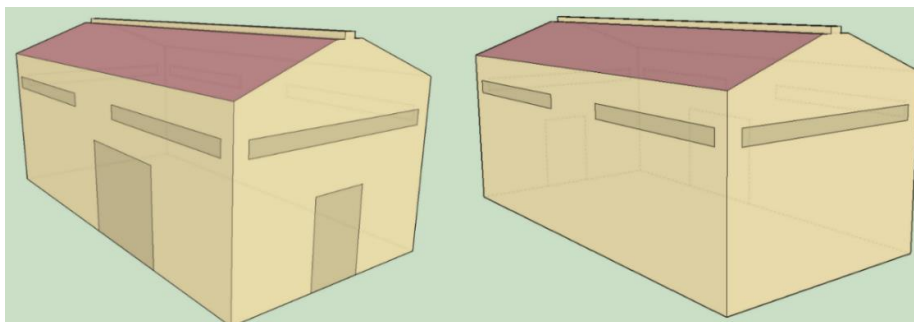


Figura 5. Vistas do modelo geométrico definido – Software SketchUp.

Em outro caminho, buscou-se avaliar o conforto térmico testando diferentes taxas fixas de renovação de ar, variando de 1 a 32 ren/h sobre todos os casos construtivos. Os resultados mostraram que para reduzir o desconforto térmico no galpão, é preferível ter uma taxa de renovação mais baixa, mas isso requer uma diminuição na área de abertura. Além disso, o uso de lanternins para ventilação natural foi avaliado, mostrando uma maior taxa de trocas de ar, porém com um aumento no desconforto. Portanto, optou-se pelo mantimento da área equivalente a 4% do piso para atendimento da ASHRAE 62.1 (2016).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais resultados obtidos no estudo estão dispostos nesse capítulo, havendo ainda resultados complementares dispostos sobre os apêndices que fundamentam as discussões feitas.

5.1 Alterações na envoltória

A partir do modelo definido na seção 4.3 com área de abertura em conformidade com a ASHRAE 62.1, comparou-se o Caso 1 com os demais propostos. As figuras 6 e 7 apresentam o comportamento térmico para semana de verão e de inverno de projeto para todos os casos. O Caso 1 apresenta diferença em relação a seção 4.1, pois também foi testado com 5,12 m² de abertura efetiva e, assim, foi influenciado pela ventilação natural.

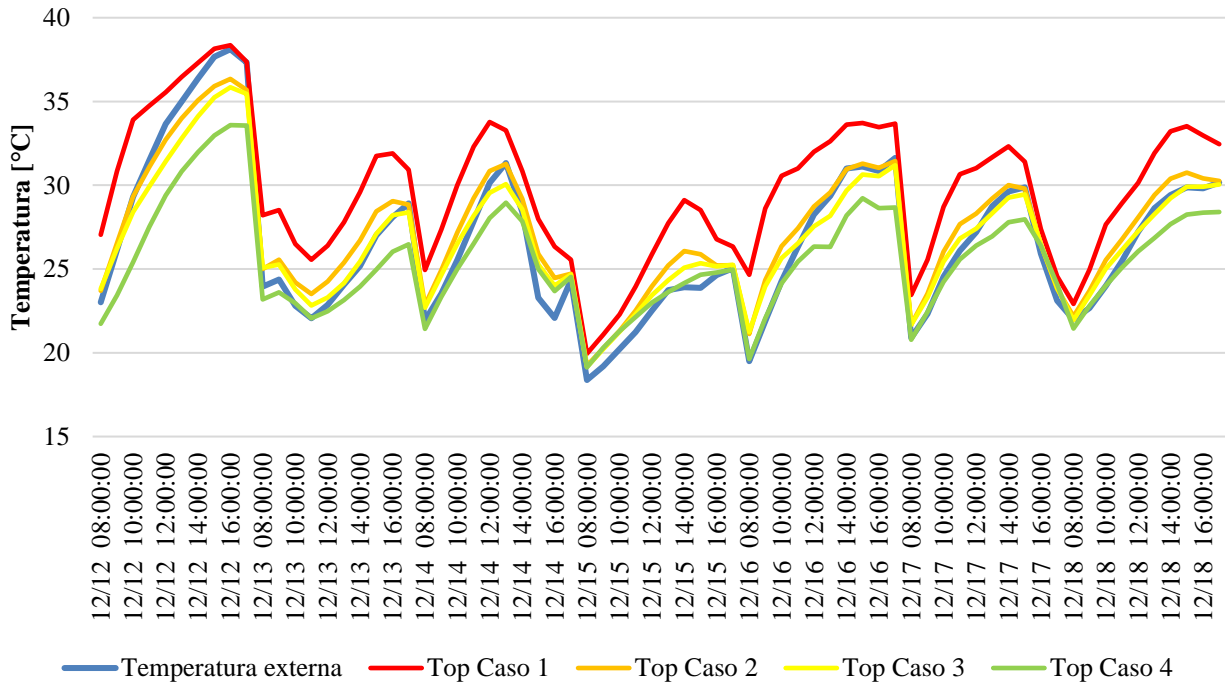


Figura 6. Comparação da temperatura operativa dos casos de envoltória para a semana típica de verão de projeto.

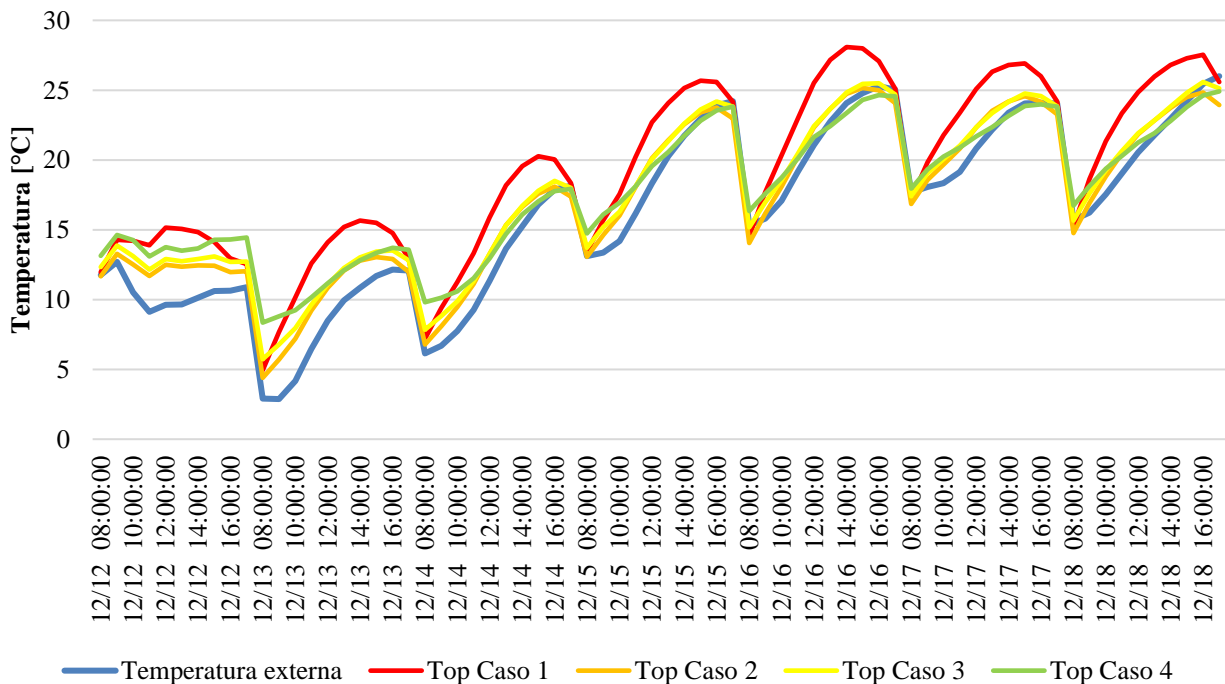


Figura 7. Comparação da temperatura operativa dos casos de envoltória para a semana típica de inverno de projeto.

Em ambas as imagens se percebe que a pintura branca aplicada gerou bastante diferença entre o Caso 1 e o Caso 2, sendo uma estratégia vantajosa para o verão e indevida para o inverno. Conforme é mostrado na figura 8, o desconforto causado pelo calor é bem maior, portanto, a pintura branca se encaixa como uma proposta cabível. Da mesma forma, percebe-se que os casos que contém isolamento apresentam menor amplitude térmica, temperaturas mais baixas no verão e mais altas no inverno, conforme desejado. A tabela 3 expõe os valores de temperatura operativa média, mínima e máxima de cada caso para o ano inteiro, assim como a média da taxa de renovação de ar por hora. Em complemento, é mostrado os valores para a temperatura externa, permitindo a avaliação dos casos conforme comportamento externo.

Tabela 3. Comparação do comportamento térmico e taxa de trocas de ar entre casos de construção.

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
Text média	21,1 °C			
Text máxima	37,2 °C			
Text mínima	3,5 °C			
Top média	24,0 °C	22,1 °C	22,0 °C	21,6 °C
Top máxima	38,8 °C	36,2 °C	35,9 °C	34,3 °C
Top mínima	4,6 °C	3,8 °C	5,9 °C	8,7 °C
Trocas de ar	9,8 Ren/h	9,0 Ren/h	8,8 Ren/h	8,2 Ren/h

Uma vez que a ventilação natural é causada pela diferença de temperatura e pressão entre ambiente externo e interno, é compreendido o porquê da diminuição gradual da taxa de renovação ao avanço dos casos. O Caso 4 é o que mais assemelha a temperatura média do galpão em relação ao exterior, por isso tem uma ventilação menos eficiente. Por outro lado, ainda assim esse caso é o mais adequado a ser escolhido, pois apresenta a melhor temperatura operativa média e seus picos máximo e mínimo são os menos críticos. A figura 8, que mostra a quantidade de horas de desconforto de frio e calor de todos os casos pelo método do PMV, remata essa decisão.

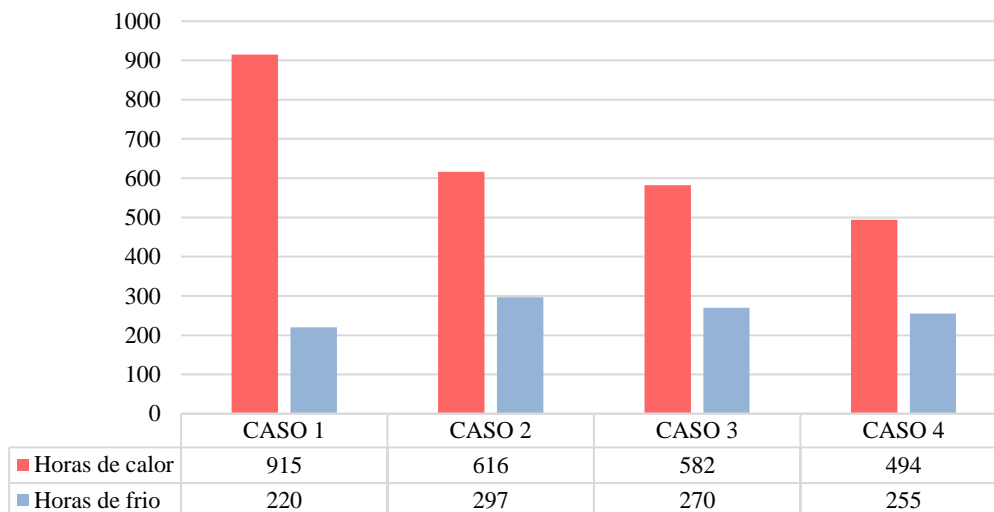


Figura 8. Comparação de horas de desconforto entre os casos de envoltória.

Por causa do ganho de calor radiante da envoltória, o Caso 1 ainda apresenta o menor número de horas de desconforto de frio. Por outro lado, o Caso 4 apresenta brandamente maior atendimento ao PMV. A tabela 4 mostra a representatividade dessas horas de desconforto.

Tabela 4. Representatividade de desconforto térmico dos cenários de construção.

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
Horas de calor	35,1%	23,6%	22,3%	18,9%
Horas de frio	8,4%	11,4%	10,3%	9,8%
Desconforto total	43,5%	35,0%	32,6%	28,7%

5.2 Janelas operáveis

Uma alternativa para reduzir as horas de desconforto, principalmente para o inverno, é propor a instalação de venezianas operáveis, cuja abertura possa ser regulada conforme estado da temperatura externa. Dessa forma, aplicou-se o

controle para as venezianas da fachada de maior comprimento de maneira que essas fossem fechadas quando a temperatura externa estiver abaixo de 16 °C. Além dessa medida, definiu-se o fechamento de todas as aberturas em horário não comercial, fazendo com que no inverno não haja diminuição de temperatura no galpão durante a madrugada. A tabela 5 apresenta a melhora que essa estratégia trouxe para o conforto térmico em relação ao Caso 4, mostrando o controle realizado de forma parcial (apenas venezianas das fachadas maiores) e total de abertura.

Tabela 5. Avaliação da renovação de ar e horas de desconforto para o Caso 4 com venezianas operáveis.

	Ren/h média	Horas com Ren/h abaixo da norma	Horas de desconforto de calor	Horas de desconforto de frio	Horas de desconforto total
Venezianas fixas	8,2	2,5%	18,9%	9,8%	28,7%
Controle parcial	6,8	3,0%	18,8%	6,4%	25,2%
Controle total	5,9	21,9%	18,1%	2,3%	20,5%

O controle das aberturas causou impacto na redução das horas de desconforto de frio devido ao fato de a área de aberturas de ventilação ter reduzido. Percebe-se que não é possível melhorar ao mesmo tempo conforto térmico e qualidade do ar diante das estratégias propostas, pois enquanto as horas de desconforto de frio reduzem, as horas com ren/h abaixo do mínimo exigido aumentam. Por causa disso, escolheu-se o Caso 4 com controle parcial de aberturas, tolerando-se os 3% de horas de ren/h abaixo do mínimo exigido e assumindo-se que não será instalada ventilação mecânica de ar externo para essa situação.

5.3 Ventilação mecânica

Para sanar as demasiadas horas de desconforto de calor foi proposto a inserção de ventiladores mecânicos localizados em pontos estratégicos para suprimento de ar ventilado aos trabalhadores. A análise partiu da simulação feita na seção 4.4, propondo que a velocidade do vento seja de 1,5m/s. Como o PMV não admite velocidades acima de 0,2 m/s, foi necessário seguir o ajuste proposto no Apêndice G da ASHRAE 55.1 (2010) para a sua correta avaliação. A tabela 6 mostra a radical redução de horas de desconforto de calor para o Caso 4 com aberturas operáveis e ventiladores mecânicos.

Tabela 6. Avaliação das horas de desconforto para o Caso 4 com acréscimo de ventilação mecânico.

	Horas de desconforto de calor	Horas de desconforto de frio	Horas de desconforto total
Controle parcial de aberturas	18,8%	6,4%	25,2%
Controle parcial de aberturas e ventiladores mecânicos	3,1%	6,4%	9,6%

Sendo este considerado o melhor caso, resultou-se em 9,6% de horas de desconforto totais, o que equivale a 251 horas em período de trabalho.

6. CONCLUSÕES

A comparação entre os diferentes casos construtivos demonstrou que intervenções como a aplicação de pintura branca nas superfícies externas e a inclusão de isolamento térmico nas paredes e cobertura contribuíram para a redução da amplitude térmica sazonal e para o alívio do desconforto térmico. O controle parcial das aberturas também desempenhou um papel crucial na otimização das condições térmicas internas, diminuindo as horas de desconforto de frio. Relata-se que o clima da região dificulta as definições de projeto, pois exige preocupação tanto com desconforto causado por temperaturas altas como para baixas.

A partir dos testes de variação de abertura percebe-se que não é possível melhorar ao mesmo tempo o número de horas de desconforto térmico e o número de horas com a taxa de renovação de ar por hora abaixo do mínimo proposto pela ASHRAE 62.1, pois alteram-se inversamente. Idealmente a melhor situação para o galpão seria com uma taxa média de 2 ren/h, porém para garantir qualidade do ar interno deveria ser instalado sistema mecânico de fornecimento de ar externo. Uma vez que o lanternim causa o aumento da taxa média de renovações de ar por hora, concluiu-se que para o cenário de estudo sua presença não será vantajosa.

Para combater as horas de desconforto térmico causadas pelo calor, a introdução de ventiladores mecânicos em pontos estratégicos mostrou-se eficaz. Dessa forma, comparando o melhor caso, apresentado na seção 4.5, com o cenário atual, contempla-se com a redução de 33,2% das horas de desconforto total.

Em resumo, por meio da combinação de diferentes estratégias de design e controle, foi possível estimar uma melhora substancial das condições de conforto térmico no galpão. Os resultados deste estudo destacam a importância de considerar o uso adequado de materiais e a disposição de aberturas de ventilação ao projetar ambientes confortáveis e eficientes do ponto de vista energético.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a colaboração da Professora da Escola de Engenharia da UFRGS, Letícia J. Rodrigues, e dos colegas da empresa Petinelli no desenvolvimento da pesquisa, bem como a oportunidade de divulgação do estudo cedida pela Comissão Científica do MERCOFRIO.

7. REFERÊNCIAS

- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers). "ANSI/ASHRAE Standard 169-2020: Climatic Data for Building Design Standards", Atlanta: ASHRAE, 2021.
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers). "ASHRAE Standard 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.", Atlanta: ASHRAE, 2013.
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers). "ASHRAE Standard 62.1-2016: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality", Atlanta: ASHRAE, 2016.
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers). "ASHRAE Standard 90.1-2010: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings", Atlanta: ASHRAE, 2010.
- BERKELEY UNIVERSITY OF CALIFORNIA, CBE (Center for the Built Environment). "CBE Thermal Comfort Tool" <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>. Acessado em 21/08/2023.
- Camargos, B., H., L; "Desempenho térmico de galpões industriais equipados com lanternins" Dissertação (Trabalho de Conclusão de Mestrado de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.
- DuBois, D. and DuBois E.F., "A Formula to Estimate Approximate Surface Area, if Height and Weight are Known", Archives of internal Medicine, Vol.17, 1916.
- ENERGYPLUS. "EnergyPlus". Disponível em: <https://energyplus.net/>.
- ENERGYPLUS, U.S. D. of E. "Engineering Reference". Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v23.1.0/EngineeringReference.pdf
- ENERGYPLUS, U.S. D. of E. "Input Output Reference". Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v23.1.0/InputOutputReference.pdf
- Lamberts, R.; et al. "Desempenho térmico de edificações". Laboratório De Eficiência Energética Em Edificações, Universidade Federal De Santa Catarina. Florianópolis. 2016.
- LEIS MUNICIPAIS. "Código de obras de Porto Alegre - RS". Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/codigo-de-obras-porto-alegre-rs>.
- SULFIBRA. "Placas de Poliuretano PIR (Pliisocianurato)". Disponível em: <https://sulfibra.com.br/nossos-produtos/placas-de-poliuretano-pir-pleisocianurato/>.
- Wallauer, M., D.; "Utilização do programa EnergyPlus para a simulação do conforto térmico em edificações populares em quatro capitais brasileiras" Dissertação (Trabalho de Conclusão de Mestrado de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

THERMAL COMFORT ASSESSMENT IN AN INDUSTRIAL WAREHOUSE THROUGH THERMOENERGETIC SIMULATIONS

Abstract. *This study assessed a small industrial warehouse in Cruzeiro do Sul (RS), where an inadequate thermal condition has been reported. Accordingly, the main objective was to enhance the thermal comfort within the warehouse's interior, aiming to provide more favorable conditions for the occupants. Modifications to the building envelope and the implementation of openings for natural ventilation were proposed to achieve it. Cross-ventilation and chimney effect were tested using a louvered roof vent. Strategies such as Venetian blind control and mechanical ventilation were evaluated based on the most promising scenario. Thermal comfort indicators were obtained using the Predicted Mean Vote (PMV) method for all hours of the year. Based on thermoenergetic simulations using EnergyPlus, the analysis revealed that applying white paint to external surfaces and adding thermal insulation to walls and roofs contributed to reducing thermal variation and alleviating thermal discomfort. Partial control of Venetian blinds contributed to reducing hours of cold discomfort, while the introduction of mechanical fans reduced thermal discomfort caused by heat. A significant reduction of 33.2% compared to the most favorable scenario, with 9.6% of total discomfort hours, to the current situation.*

Keywords: Thermal comfort, Natural ventilation, Thermoenergetic simulation, Air quality.