

MERCOFRIO 2006 - V CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES TÉRMICAS DE UMA EDIFICAÇÃO INDUSTRIAL

André Stein Lacchini – aslacchini@yahoo.com

Paulo Otto Beyer – pob@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

F0812 – Conforto Térmico

Resumo. *Este trabalho apresenta um estudo sobre as condições térmicas de uma indústria, já existente, que realiza trabalhos nas áreas de marcenaria e pintura na cidade de Porto Alegre. Com o objetivo de obter melhorias nas características higrotérmicas do ambiente de trabalho, foi testada a influência de diferentes parâmetros físicos no desempenho da edificação.*

Para alcance desta meta, foi utilizado o programa computacional EnergyPlus, como simulador das modificações propostas no envoltório do edifício. As análises foram realizadas sobre gráficos que informaram a evolução livre da temperatura de bulbo seco, temperatura média radiante, umidade relativa do ar e PMV (predicted mean vote) na edificação.

Os resultados mostraram que a modificação das cores das superfícies reduz sensivelmente a absorção de radiação térmica. Esta alteração tem mais eficiência quando realizada no plano da cobertura, acusando a inserção de manta aluminizada nas telhas como técnica de melhor relação entre custos e benefícios, dentre as testadas, para redução da temperatura interna no verão. Porém, no inverno, a redução da absorção térmica não colabora para o aumento das temperaturas internas. Concluiu-se que, para um melhor desempenho da edificação em todas as estações do ano, a aplicação de isolamento térmico, apesar de seu custo elevado, obteve melhor rendimento.

Palavras-chave: *Conforto térmico, Energyplus, Simulação, Indústria, Trabalho.*

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de trabalho em condições inóspitas de calor e umidade faz com que o corpo humano trabalhe sob condições de estresse, ou seja, precisando gerar ou perder calor para manter o corpo em equilíbrio. Segundo Beyer (2005), as condições de desconforto térmico, além de trazerem mal estar e problemas de saúde, geram redução da produtividade dos trabalhadores.

Para melhoria das condições térmicas de locais de trabalho, muitas vezes torna-se necessária a utilização de sistemas de condicionamento de ar ou ventilação artificial. Isto amplia o consumo energético da edificação, gerando aumento dos custos da empresa.

A respeito da qualidade dos ambientes de trabalho, muitas vezes, sua falta se deve a uma série de medidas simples que deixaram de ser realizadas ainda na etapa de projeto da edificação. Segundo Pereira (2005), são comuns queixas dos ocupantes em relação à temperatura interna alta ou à alta intensidade da radiação solar proveniente das janelas. Segundo Silva (2006), uma das principais formas de ganho e perda de calor em edificações é através da cobertura.

Observa-se então, a possibilidade de melhoria no desempenho termoenergético de edificações através da modificação de parâmetros construtivos como isolamentos, aberturas e revestimentos.

1.1 Apresentação do problema

A proposta apresentada é estudar as condições térmicas de uma edificação industrial existente em Porto Alegre, através do programa computacional de simulação *EnergyPlus* versão 1.3.0.018. A

escolha do local a ser analisado se deu por tratar-se de edifício com problemas de conforto térmico, verificado através de reclamações dos usuários.

Através da simulação computacional, propõe-se estudar o comportamento térmico do edifício utilizando dias de projeto de verão e inverno. Busca-se obter resultados de temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, temperatura média radiante e *PMV* (*predicted mean vote*).

A partir dos resultados obtidos, pretende-se avaliar os parâmetros físicos cobertura, paredes e aberturas, propondo modificações nos mesmos na tentativa de obter melhores resultados no desempenho térmico da edificação em questão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pereira (2005), apresentou um estudo sobre a influência de parâmetros físicos no desempenho termoenergético de uma edificação com sistema de condicionamento de ar. Utilizando o programa simulador *EnergyPlus*, foram obtidos resultados mostrando que a orientação e os tipos de vidro alteram sensivelmente a potência requerida pelo sistema de ar-condicionado e o consumo elétrico.

Silva (2003), comparou dados obtidos através da utilização do programa computacional *EnergyPlus*, com valores aferidos de consumo de energia elétrica em agência bancária existente em Porto Alegre. O autor concluiu que os resultados simulados foram próximos aos medidos.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Conforto térmico

O organismo do homem funciona com a manutenção de uma temperatura interna constante. Essa temperatura é da ordem de 37°C, com limites muito estreitos – entre 36,8°C para situação de descanso e 37,9°C para situação de exercício intenso –, sendo 28°C o limite inferior e 46°C o limite superior para sobrevivência, em estado de enfermidade.

Segundo Barros (2003), a energia térmica produzida pelo organismo humano é gerada a partir de reações químicas internas, sendo a mais importante a combinação do carbono e do hidrogênio, introduzido no organismo sob a forma de alimentos, com o oxigênio, extraído do ar pela respiração. Esse processo de produção de energia a partir de elementos orgânicos é denominado metabolismo.

O organismo humano, através do metabolismo, adquire energia. Caso a dissipação de calor gerado pelo metabolismo humano não fosse controlada por mecanismos de regulação térmica, a temperatura interna do corpo entraria em níveis que levariam a enfermidade ou morte. A partir desses conceitos, pode-se deduzir conforto térmico como a condição em que o corpo humano dissipa exatamente a mesma quantidade de calor gerada por seu metabolismo, sendo capaz de manter sua temperatura interna em uma faixa entre 36,8 e 37,9°C.

Porém, segundo Fanger (1972), em função de o conforto térmico envolver variáveis ambientais e pessoais, não é possível satisfazer termicamente todas as pessoas que estão submetidas ao mesmo ambiente térmico. Desta forma, subjetivamente, o conforto térmico pode ser definido como “a condição da mente na qual é expressa satisfação com o ambiente térmico” (ASHRAE, 2001).

3.2 Trocas térmicas e termoregulação humana

A atividade metabólica da pessoa resulta na geração de calor, que deve ser dissipado de maneira controlada com o ambiente para manutenção da temperatura do corpo. Para obter essa regulação térmica, ou balanço energético, o corpo humano utiliza mecanismos de trocas térmicas:

Perdas de calor latente pela pele. O calor latente é dissipado através da energia consumida para realização da evaporação do suor sobre a pele.

Perdas de calor sensível pela pele. Para que ocorram trocas sensíveis entre a pele e o ambiente, o calor deve atravessar a vestimenta, existindo basicamente a condução, sendo que a convecção e a radiação se dão nos espaços de ar entre a pele e a vestimenta.

Perdas de calor pela respiração. Durante a respiração, o corpo humano inspira ar na temperatura ambiente e o expira em uma temperatura menor do que a interna do corpo. Ocorrendo perda de calor sensível e latente por convecção do calor do fluido e evaporação do vapor d'água.

3.3 Variáveis que influenciam no conforto térmico

Temperatura do ar (T_{bs}). Aferida com termômetro de bulbo seco, é a temperatura em torno da pessoa utilizada para determinação da transferência de calor por convecção entre a pessoa e o ambiente ao seu redor ($^{\circ}\text{C}$).

Temperatura média radiante (T_{mr}). Segundo a ISO 7726 (1998) corresponde à temperatura uniforme de um ambiente fechado imaginário em que a transferência de calor radiante vindo do corpo humano é igual à transferência de calor radiante no ambiente real não uniforme ($^{\circ}\text{C}$).

Conteúdo de umidade (W_a). Representa a quantidade real de massa de vapor de água contida no ar em comparação a uma quantidade real de massa de ar seco (kgVA/kgAS).

Umidade relativa do ar (U_{rel}). É a relação entre o conteúdo de umidade existente em um determinado ambiente e o conteúdo de umidade para saturação do ar na mesma condição de temperatura e pressão atmosférica, sendo expresso em %.

Taxa metabólica (M). É a conversão de energia química em mecânica e térmica, medindo o custo energético da carga muscular, gerando índice numérico de potência (W).

Resistência térmica das vestimentas (I_{cl}). A vestimenta funciona como um isolante térmico entre a pele e o meio ambiente, atuando como barreira na transferência de calor por convecção e por irradiação. Seus níveis são medidos em unidades de resistência ao fluxo de calor ($\text{m}^2\text{C/W}$).

3.4 Voto médio previsto (PMV – predicted mean vote)

Foi estudado e desenvolvido por Fanger (1972) e normatizado pela ISO em 1994. Este índice prediz a resposta média de um grupo de pessoas a respeito de sua sensação térmica em um ambiente, através de uma escala de classificação de 7 ou 9 pontos. O PMV está relacionado com o balanço energético entre as perdas de calor do corpo, em um ambiente, e a dissipação de calor necessária para que se obtenha conforto durante a realização de determinada atividade.

4. OBJETO DE ANÁLISE

O objeto de análise trata-se de uma edificação de uso industrial e administrativo localizada na Avenida das Indústrias, na cidade de Porto Alegre. Para fins de cálculo, a localização geográfica utilizada é latitude 30° sul, longitude $51,18^{\circ}$ oeste e altitude de 3 metros em relação ao nível do mar.

Para obtenção dos resultados de simulação no programa *Energyplus*, utilizaram-se 5 dias típicos de projeto que caracterizam as situações extremas de conforto térmico no inverno e no verão. Foi selecionado um dia típico de inverno, 21 de julho, e quatro dias típicos de verão, 21 de dezembro, 21 de janeiro, 21 de fevereiro e 21 de março.

O presente trabalho analisará e simulará todo o pavilhão industrial com exceção das áreas de escritório, que já possuem sistema de climatização artificial. A área simulada contabiliza $383,24\text{m}^2$.



Figura 1 - Vistas externas do pavilhão industrial simulado.

5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para simular as condições térmicas da edificação, foi utilizado o programa simulador *Energy-plus* versão 1.3.0.018. Este *software* é disponibilizado pelo Departamento de Energia Americano gratuitamente na rede mundial de computadores.

Sua criação foi realizada sobre a plataforma de dois outros programas: *BLAST (Building Loads Analysis and Thermodynamics)* e *DOE-2 (Department of Energy)*, com o objetivo de permitir o desenvolvimento de modelos em uma plataforma de computadores pessoais, através da técnica modulada de análise de balanço de calor. Este programa permite o cálculo de transferência de calor, sistemas de ventilação e sistemas de ar-condicionado.

6. DADOS DE ENTRADA

6.1 Levantamento arquitetônico

Para possibilitar a modelagem da edificação no *software*, foi necessária a realização do levantamento arquitetônico da edificação estudada, bem como da composição construtiva das superfícies de fechamento e das aberturas. Os materiais construtivos devem ser informados ao programa para possibilitar o cálculo das variáveis térmicas do edifício. Estes elementos possuem características termofísicas que foram consultadas no *dicionário de materiais* obtido no Lafrig – Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS.

6.2 Cotidiano de ocupação

Para realizar a simulação térmica foi necessário fornecer ao programa computacional um “*schedule*”, ou seja, uma tabela com o cotidiano dos funcionários para a área calculada.

O trabalho na empresa se desenvolve das 8 às 18 horas com uma média de 15 trabalhadores atuando na zona calculada. As vestimentas típicas consideradas para verão possuem resistência térmica média de 0,5clo ou 0,078 m²°C/W e, para inverno, de 1,0clo ou 0,155 m²°C/W, segundo Guimarães (2001). Considerando que os funcionários realizam atividades desgastantes, foi assumida uma taxa de atividade metabólica de 170W por pessoa, representando trabalho intenso.

6.3 Geração interna de calor por equipamentos elétricos

Além da geração de calor no interior do edifício pelo metabolismo dos funcionários em atividade, é necessária a informação da taxa de energia calorífica gerada por equipamentos elétricos e sistema de iluminação artificial em unidade de potência.

Através de levantamento dos equipamentos elétricos utilizados na zona de cálculo, bem como sua rotina de utilização diária, foi calculado um total de 27.703 W para equipamentos elétricos, 5.000 W para equipamentos de aquecimento de água e 4370 W para sistema de iluminação.

7. METODOLOGIA DE TRABALHO

A meta proposta pelo trabalho foi estudar formas de melhoria das condições térmicas do ambiente de uma edificação industrial, através da modificação de parâmetros físicos da construção. Para alcance deste objetivo, a metodologia utilizada foi a avaliação de resultados numéricos.

Através do auxílio do programa computacional *EnergyPlus*, foram realizadas simulações das condições térmicas da edificação, obtendo valores numéricos de temperatura de bulbo seco do ar, temperatura média radiante, umidade relativa e *PMV*. A partir desses dados, foram propostas modificações construtivas que podem alterar os valores simulados.

8. MEIOS DE MODIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES TÉRMICAS

Segundo Mascaró, 1989, freqüentemente, o sítio de projeto e as características físicas necessárias para o funcionamento de uma edificação impõem restrições que limitam as soluções de projeto. Mas é possível obter um bom desempenho térmico através do uso de elementos de controle ambiental, tais como: isolamento térmico, ventilação do edifício e de câmaras de ar, cor de superfícies exteriores do edifício, controle do tamanho e proteção das aberturas e sombreamento das superfícies expostas à radiação solar.

Como o estudo está baseado em uma edificação existente, optou-se pelo uso de técnicas passíveis de aplicação sem modificação da estrutura do prédio. Essa escolha foi tomada, pois o custo de tais alterações poderia inviabilizar sua execução. Portanto, foram simuladas a execução de isolamentos térmicos, modificação das cores das superfícies e a criação de câmaras de ar.

Segundo Costa, 1979, isolantes são materiais de baixo coeficiente de condutibilidade κ (W/m°C). O coeficiente κ quantifica a capacidade do material de ser atravessado por um fluxo de calor através da condução, induzido por uma diferença de temperatura entre dois ambientes que o elemento separa. Materiais com baixo valor de coeficiente κ possuem, normalmente, alta porosidade, e sua elevada resistência térmica está baseada na baixa condutibilidade do ar contido em seus vazios. A partir dessa característica física, pode-se concluir que quanto menor a densidade do material e maior a sua porosidade, maior será seu poder de isolamento.

A cor das superfícies pode aumentar ou reduzir a energia térmica absorvida através da radiação. Corpos negros porosos têm coeficiente de absorção solar próximos de 1, ao passo que corpos brancos e polidos têm coeficiente próximos de 0. Neste estudo, a capacidade de absorção das superfícies exteriores será testada como forma de modificação das condições térmicas do ambiente.

O último fator simulado neste estudo foi a criação de uma câmara de ar entre as telhas e um forro com características isolantes térmicas. Segundo Mascaró (1989), as câmaras de ar são formas eficientes de melhorar o desempenho térmico do envolvente do edifício. Sua eficiência ocorre devido à resistência térmica (m²°C/W) à passagem do calor pela edificação. O valor desta resistência varia de acordo com as características físicas da composição dos espaços de ar.

8.1 Modificação de parâmetros físicos

Para alteração das condições térmicas da edificação estudada, foram modificados parâmetros construtivos não estruturais. Na cobertura foi simulada a sua substituição por telhas tipo sanduíche, instalação de isolamento térmico sob as treliças de fixação das telhas composto por camada de lã de vidro, pintura da face externa das telhas com tinta esmalte cor branco brilhante e instalação de manta aluminizada na face externa das telhas. Nas paredes e aberturas, foi simulada a pintura de todos os planos externos com tinta semibrilhante cor branca.

9. RESULTADOS E ANÁLISES

Para aferição dos resultados, foi decidido simular cada parâmetro físico modificado em separado, possibilitando verificar o desempenho de cada alteração na edificação. Para avaliação do desempenho máximo das alterações, foi simulada a aplicação das modificações simultaneamente.

Para cada simulação foram gerados os resultados das variáveis de temperatura de bulbo seco do ar, temperatura média radiante, umidade relativa do ar e PMV (*predicted mean vote*). Os resultados da seqüência de simulações foram obtidos com a vazão de ar calculada fixa e, posteriormente, reduzida em 30% de seu valor calculado, para avaliação de uma situação crítica de infiltração.

9.1 Infiltração de ar calculada

A seguir, serão apresentados os gráficos com os resultados das simulações de cada parâmetro físico modificado, com a utilização do valor de infiltração fixo de ar de 7,2 trocas do volume do

ambiente por hora. Este cálculo foi realizado de maneira interativa com o *EnergyPlus*. Para avaliação das variáveis citadas, as simulações foram realizadas para os cinco dias típicos de projeto selecionados, sendo o dia de inverno considerado como nublado, ou seja, não possui a interferência da radiação solar em seus resultados. A simulação acusou o dia 21 de janeiro como o mais crítico:

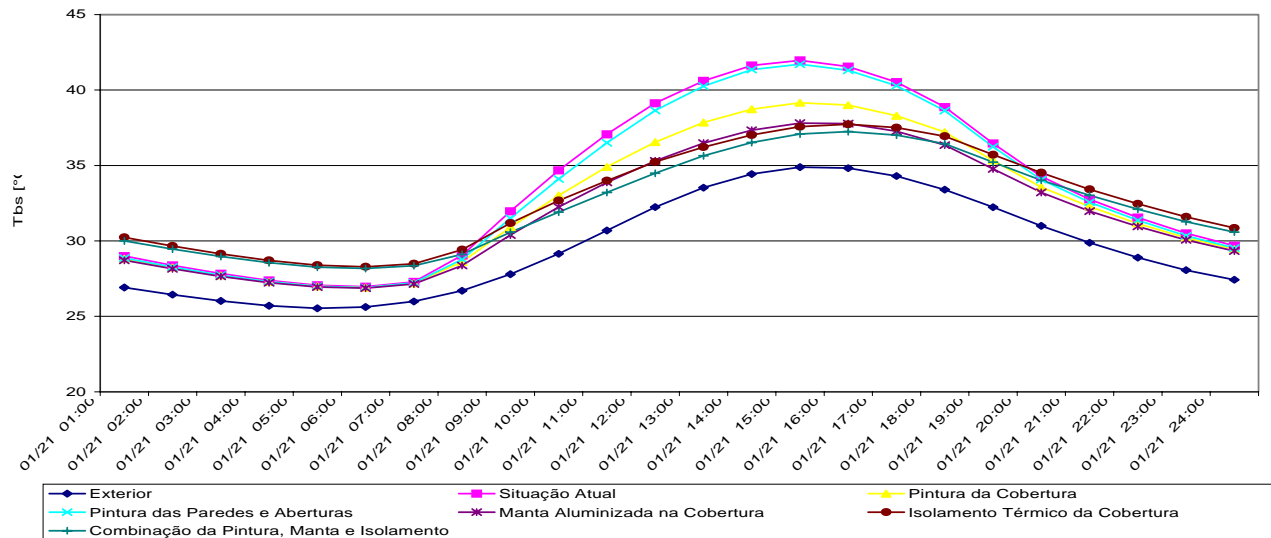


Figura 2 - Temperatura de bulbo seco do ar para dia crítico.

Os resultados indicaram Tbs máxima de $34,8^{\circ}\text{C}$ no exterior e $42,0^{\circ}\text{C}$ no interior da edificação existente. Com a aplicação de pintura branca nas paredes e aberturas houve uma queda de $0,8^{\circ}\text{C}$ na temperatura interna do edifício. Já com a realização de pintura branca apenas nas telhas a queda foi mais significativa, atingindo uma Tbs interna de $39,1^{\circ}\text{C}$. Neste caso, a modificação dos planos horizontais mostrou-se mais eficiente no verão, pois recebem maior carga térmica.

A instalação de manta aluminizada nas telhas atingiu Tbs interna de $37,8^{\circ}\text{C}$ e a execução de isolamento térmico, criando câmara de ar na cobertura, de $37,6^{\circ}\text{C}$. Porém, no inverno, a redução da absorção solar é desvantajosa, não aumentando a temperatura interna do edifício. A aplicação simultânea das alterações atingiu ΔTbs máximo de -5°C no verão e $+4,2^{\circ}\text{C}$ no inverno, mostrando a possibilidade de combinação de alterações para melhoria das condições térmicas ao longo do ano.

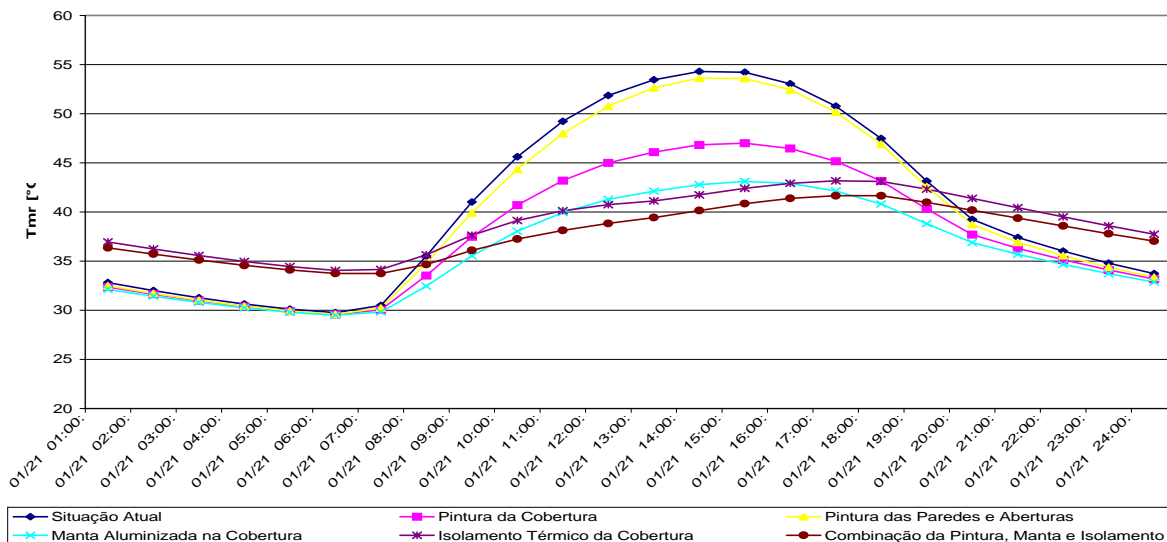


Figura 3 - Temperatura média radiante do ar para dia crítico.

A simulação da temperatura média radiante indicou valor máximo de $54,3^{\circ}\text{C}$ no interior da edificação no verão. Após a aplicação de pintura branca nas paredes e aberturas, houve uma queda de $0,8^{\circ}\text{C}$ na Tmr do edifício. Já a pintura da cobertura se apresentou mais eficiente, reduzindo a Tmr

para 47,0°C. A instalação da manta aluminizada, assim como a do isolamento térmico, obtiveram o ΔT_{mr} de -11,2°C. O isolamento térmico se mostrou vantajoso no inverno e no verão.

A aplicação simultânea das modificações atingiu ΔT_{mr} máximo de -12,7°C no verão e +5,1°C no inverno. A variação máxima de T_{mr} no inverno foi menor que no verão, porém, não eliminando a necessidade de aplicação de modificações efetivas para todas as estações do ano.

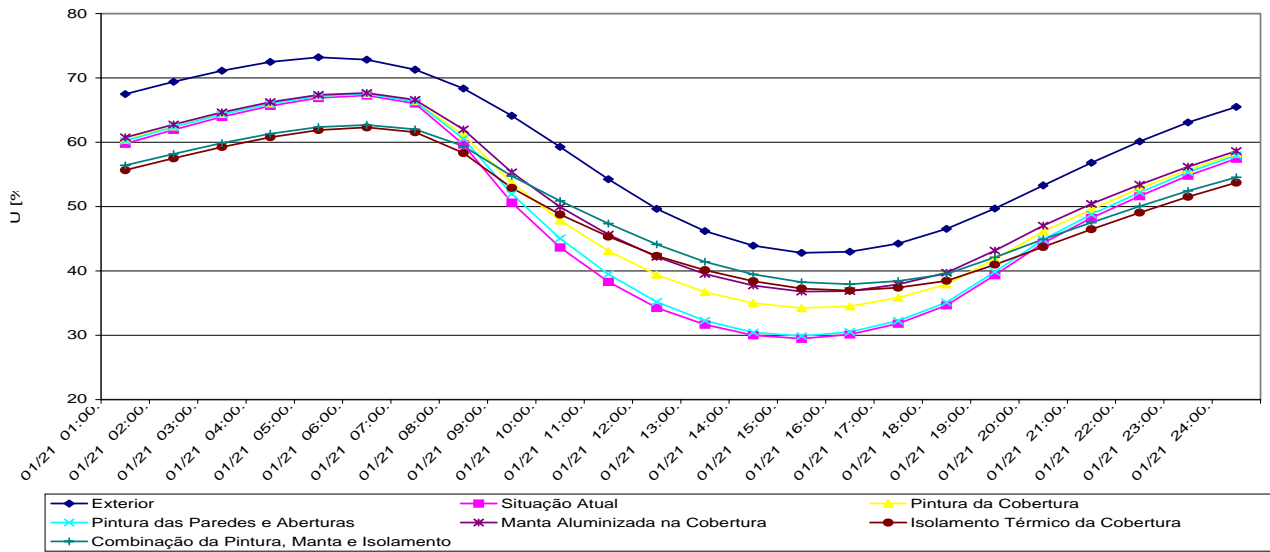


Figura 4 - Umidade relativa do ar para dia crítico.

Os resultados indicaram variação da umidade relativa do ar exterior de 42,8% durante o dia até 72,3% durante a noite no verão. No interior da edificação existente, a variação foi de 29,8% a 67,7% do dia para a noite no verão. Já para o inverno, a situação exterior apresenta um dia saturado, com 100% de U_{rel} , enquanto que a interior apresenta variação de 87,3% a 94,7% do dia para a noite.

A aplicação de pintura branca nas paredes e aberturas do edifício não apresentou alterações significativas de U_{rel} . Já a aplicação da pintura branca na cobertura elevou a U_{rel} para 34,2% durante o dia de verão. A instalação de manta aluminizada, bem como de isolamento térmico, permitiram a elevação da U_{rel} para 37,3%, se mostrando mais eficientes do que a técnica da pintura na cor branca. No inverno, apenas o isolamento térmico permitiu a redução dos níveis de U_{rel} elevados.

A aplicação simultânea das modificações permitiu o alcance de 38,0% de U_{rel} no dia de projeto de verão e de 74,8% no dia de projeto de inverno. Portanto, verificou-se melhora nos padrões de U_{rel} para verão e inverno, com a amenização dos valores.

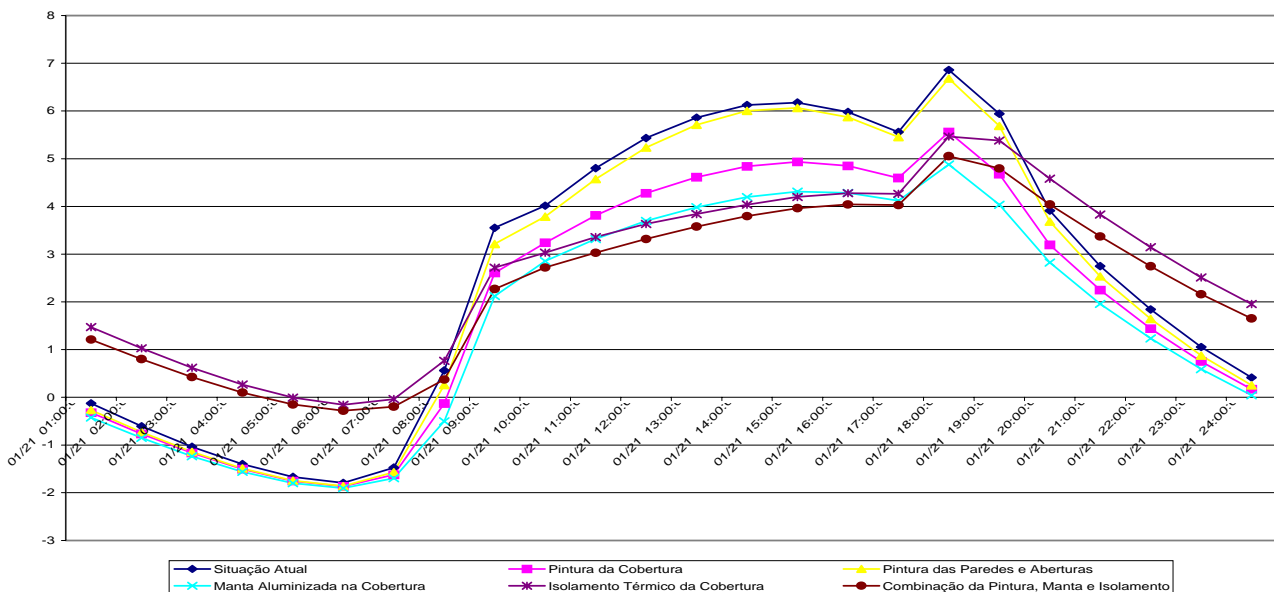


Figura 5 - PMV para dia crítico.

Os gráficos representativos do índice *PMV*, ao longo dos dias de projeto selecionados, apresentaram valores que variam de 11 pontos negativos até 6 pontos positivos. Como este índice foi desenvolvido para ambientes climatizados, seus resultados são conclusivos quando numa faixa de 3 pontos negativos até 3 pontos positivos. Atribuem-se os valores altos obtidos devido a edificação simulada não possuir sistema de climatização ou ventilação artificial. Desta maneira, não serão extraídas conclusões diretas dos resultados.

Porém, mesmo não sendo conclusivos, os valores obtidos são indicativos das modificações das condições térmicas do ambiente estudado. Analisando o dia de projeto de inverno, fica evidente a melhoria de 1 ponto no índice *PMV* obtida com a aplicação do isolamento térmico da cobertura. Já para o dia crítico de verão, observa-se uma redução de 2 pontos no índice *PMV*.

9.2 Infiltração de ar reduzida

Com a infiltração de ar reduzida, a *Tbs* no interior da edificação existente aumentou de 42,0°C para 43,7°C, em relação à simulação com valor de infiltração calculado. A pintura das paredes e aberturas apresentou pequena redução da *Tbs* no verão, com variação de -0,4°C. A pintura da cobertura, novamente, se mostrou mais eficiente atingindo *Tbs* interna de 40,4°C. A variação encontrada com a deficiência de ventilação foi o melhor rendimento da manta aluminizada, atingindo *Tbs* de 37,8°C. No inverno, apenas o isolamento térmico possuiu capacidade de elevar a temperatura interna em dia nublado, por sua resistência térmica, registrando um ΔTbs de +3,2°C.

Com infiltração de ar reduzida, a *Tmr* da edificação existente aumentou de 54,3°C para 55,3°C, em relação à simulação com valor de infiltração calculado. Esta variação acusou uma influência menor da ventilação na *Tmr* em relação a *Tbs*, com um ΔTmr de +1,0°C. A aplicação de pintura branca nas paredes e aberturas mostrou variação reduzida com ΔTmr de -0,8°C. Já a pintura da cobertura e a manta aluminizada atingiram *Tmr* de 47,6°C e 43,2°C, respectivamente. Novamente, a redução da ventilação mostrou pouca interferência nos resultados, com ΔTmr de +0,6°C.

A aplicação simultânea das modificações atingiu ΔTmr máximo de -12,9°C no verão e +5,6°C no inverno. A análise dos resultados mostrou pequena interferência nos valores de *Tmr* quando aplicada ventilação reduzida.

A redução da infiltração de ar na simulação apresentou aumento nas variações de umidade relativa do ar no interior da edificação. Houve uma redução da *U_{rel}* de 29,8% para 27,0% no verão e de 87,3% para 84,3% no inverno durante o dia. Neste caso, a simulação acusou piora nos valores de umidade no verão e melhora no inverno. A variação encontrada com a deficiência de ventilação foi o melhor rendimento da manta aluminizada, atingindo *U_{rel}* de 36,8%, se equiparando à combinação das modificações na edificação durante o dia crítico de verão.

Os gráficos representativos do índice *PMV* apresentaram valores fora da escala de análise de 3 pontos negativos até 3 pontos positivos, portanto, não serão extraídas conclusões diretas.

Mesmo não sendo conclusivos, os valores obtidos são indicativos das modificações térmicas do ambiente estudado. Analisando o dia crítico de verão, após a redução da infiltração de ar, observa-se aumento de 1 ponto no índice *PMV*. Com a aplicação da combinação das modificações propostas, observa-se redução de 2 pontos no índice *PMV* para o dia crítico de verão. Já para o dia de inverno, o índice *PMV* aumenta em 1 ponto após a aplicação das modificações. Estas variações são próximas às obtidas com a simulação utilizando o valor de infiltração calculado.

9.3 Análise de custos e benefícios

Neste item, serão analisados os custos estimados das modificações propostas. Os valores de materiais e mão-de-obra foram obtidos no programa computacional *Volare* da editora *PINI*.

As técnicas de pintura e instalação de manta aluminizada apresentaram valores próximos de execução: a pintura da cobertura na cor branca foi estimada em R\$ 6.680,85, a instalação de manta aluminizada em R\$ 5.700,99 e a pintura de paredes e aberturas em R\$ 5.634,50.

Já a instalação de telhas isolantes térmicas e manta de lã de vidro, para aumento da resistência térmica do edifício, apresentou custo maior em função do alto valor das telhas com camada de poliestireno expandido: a instalação de telhas isolantes térmicas foi estimada em R\$ 31.212,93, a instalação de manta de lã de vidro em R\$ 9.807,48 e o custo total de isolamento em R\$ 41.020,40.

Entre os itens que reduzem a absorção térmica, o que atingiu melhor desempenho foi a manta aluminizada, com maior redução de temperaturas internas no verão. Somado ao seu desempenho, seu custo foi o menor. O isolamento térmico, apesar de seu custo elevado, realiza a função de amenização de temperaturas e níveis de umidade do ar em todas as estações do ano, atingindo desempenho semelhante ao da manta aluminizada no verão.

9.4 Análise da variação de produtividade

Os resultados apresentados de variação das condições térmicas do ambiente de trabalho simulado levam a uma última análise: a da variação de produtividade dos trabalhadores.

Uma série de pesquisas já desenvolvidas abordam este tema. Segundo Frota e Schiffer (1993), já em 1916, a Comissão Americana de Ventilação efetuou estudos com o objetivo de determinar a influência das condições higrotérmicas no rendimento do trabalho. A pesquisa visou, principalmente, abordar o trabalho físico do operário, devido aos interesses de produção surgidos com a Revolução Industrial. Resultados mostraram que, para o trabalho físico, o aumento da temperatura ambiente de 20°C para 24°C diminui o rendimento em 15%.

Os dados apresentados a respeito de pesquisas sobre a influência das condições térmicas no rendimento e saúde do trabalhador, e as análises das simulações realizadas indicam possível melhora da produtividade ocupacional na edificação estudada a partir das modificações propostas.

10. CONCLUSÕES

Conclui-se que o objetivo de melhoria das condições térmicas do ambiente de trabalho estudado foi alcançado. As simulações computacionais apresentaram, no verão, redução significativa da temperatura de bulbo seco do ar de 5,1°C, e da temperatura média radiante de 12,7°C. A umidade relativa do ar teve seus valores extremos amenizados, com aumento de 8,2% durante o dia de verão, quando o ambiente encontra-se seco em excesso. O índice de PMV, apesar de não conclusivo neste estudo, apresentou melhora em sua escala de pontuação para o verão.

Durante o dia de projeto de inverno também houve melhoras nas condições térmicas do ambiente. As simulações apresentaram aumento da temperatura de bulbo seco do ar de 4,2°C, e da temperatura média radiante de 5,1°C. A umidade relativa do ar apresentou redução de 12,5% durante o dia de inverno, quando o ambiente encontra-se úmido em excesso. O índice de PMV, apesar de não conclusivo neste estudo, apresentou melhora em sua escala de pontuação.

As análises realizadas com infiltração do ar reduzida indicaram piora nas condições térmicas do ambiente. Porém, essa modificação não reduziu o desempenho das alterações realizadas. As variações de temperatura e umidade obtidas foram semelhantes aos da simulação anterior. A alteração da infiltração de ar acusou uma melhora no desempenho da manta aluminizada no verão, e uma redução do desempenho do isolamento térmico no inverno.

Analisando a relação entre o custo e o benefício trazido pelas alterações simuladas, concluiu-se que, em ordem decrescente, as modificações mais caras foram: isolamento térmico, pintura da cobertura, instalação de manta aluminizada e pintura de paredes e aberturas. Também em ordem decrescente, as modificações que obtiveram melhor desempenho, analisado através das variações de temperatura e umidade, foram: isolamento térmico, instalação de manta aluminizada, pintura da cobertura e pintura de paredes e aberturas.

As alterações físicas simuladas na edificação mostraram a possibilidade de melhoria das condições térmicas no ambiente de trabalho, permitindo modificar positivamente as sensações dos usuários daquele local. A análise das possíveis melhorias indicadas nas simulações, somadas aos dados

apresentados sobre pesquisas acerca da saúde e da produtividade ocupacional, permite concluir que as alterações propostas na edificação possibilitam melhora no rendimento laboral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE, 2001, Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.
- BEYER, Paulo Otto, 2005, Higiene do Trabalho: conforto térmico, Apostila da disciplina de Conforto Térmico do curso de Engenharia de Segurança do Trabalho, Departamento de Engenharia Nuclear, Porto Alegre, UFRGS.
- COSTA, Ennio Cruz da, 1991, Física aplicada a construção: conforto térmico, 4ª ed. São Paulo, Edgard Blucher.
- FANGER, P. O., 1972, Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering, New York: McGraw – Hill.
- FROTA, Anésia B. e SCHIFFER, Sueli R., 2003, Manual de Conforto Térmico, 6ª ed., São Paulo, Studio Nobel.
- GUIMARÃES, L. B. M., 2001, Ergonomia de Processo, Porto Alegre: Fundação Empresa Escola de Engenharia UFRGS – FEENG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, UFRGS.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1998, ISO 7726: thermal environments – instruments and methods for measuring physical quantities, Switzerland.
- MASCARÓ, Juan e MASCARÓ, Lúcia, 1989, Coberturas: Manual de Desenho Termo-econômico, Faculdade de Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre.
- PEREIRA, Fábyo L., 2005, Determinação Computacional da Influência de Parâmetros Físicos no Comportamento Termoenergético de uma Edificação, Porto Alegre, UFRGS, Escola de Engenharia, Faculdade de Engenharia Mecânica, PROMEC.
- SILVA, C.J.C. , 2003, Simulação Termoenergética de um Sistema de Ar Condicionado para Comparação dos Resultados Medidos e Simulados, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, 24f.

EVALUATION OF THE THERMAL CONDITIONS OF AN INDUSTRIAL BUILDING

Abstract. *This work presents a study about the thermal conditions of an industry, already existant, that execute works of carpentry and painting at Porto Alegre city. With the objective to obtain improvements in the thermal and moisture characteristics of the work environment, was tested the influence of diferent physical parameters on the performance of the building.*

For such purpose, the software EnergyPlus was used like simulator of the suggested building modifications. The analisys were realized on graphics that informed the free evolution of the dry temperature, mean radiant temperature, air relative moisture and PMV (predicted mean vote) on the building.

Results showed that the modification of the surfaces colors decrease the thermal radiation absorptivity. This alteration has more effect when realized in the roof, showing aluminized face insertion on the tiles like technique with better relation between costs and benefits, comparing with the tested techniques, to reduce the internal temperature in the summer. However, in the winter, the reduction of the thermal absorptivity do not help to increase the internal temperatures. Conclusion shows that, to increase the building performance at all seasons, the insertion of thermal insulation, in spite of your higher cost, had better results.

Keywords: *Thermal confort, EnergyPlus, Simulation, Industry, Work.*