

Sensibilidade do índice PMV e regiões de conforto visando ao aperfeiçoamento de climatizadores

Sensitivity of the PMV index and comfort regions, aiming to improve HVAC systems

Rodrigo Trebien
Nathan Mendes
Gustavo H. C. Oliveira

Resumo

Os sistemas de controle de equipamentos de climatização, com base em índices de conforto térmico, em contraste com abordagens que consideram apenas temperatura e umidade, proporcionam vantagens como melhoria da qualidade térmica dos ambientes. Entre os índices para conforto térmico, a abordagem de Fanger (PMV) tem grande destaque. Porém, a obtenção desse índice em equipamentos reais é bastante problemática, em função da dificuldade de sensoriamento da temperatura radiante média e de determinação de fatores individuais, tais como a taxa de metabolismo humano e a resistência térmica das vestimentas dos ocupantes. Diante dessas dificuldades, ajustes e adaptações devem ser realizados e, conseqüentemente, existem erros devido a esses três parâmetros. Este trabalho propõe uma análise de sensibilidade do PMV com relação às três variáveis citadas, através de simulações. Para cada análise, é investigado o comportamento do índice para diferentes valores de temperatura, velocidade e umidade relativa do ar, e também para diferentes valores do parâmetro em questão. Também é importante a obtenção de uma informação referente ao peso que cada um desses parâmetros possui no modelo, independentemente de unidades e valores analisados. Neste sentido, foi realizada uma análise de sensibilidade baseada no método estatístico de Monte Carlo, não somente dessas três variáveis, mas também dos seis parâmetros do modelo. Como resultado, obtém-se um vetor de sensibilidade cujos valores são adimensionais e independentes de faixas de operação da variável analisada e dos demais parâmetros, obtidos considerando-se todas as possíveis combinações. Analisa-se também a elaboração de regiões de conforto adaptadas, para que estas sejam determinadas considerando-se fatores individuais.

Palavras-chave: Conforto térmico. Regiões de conforto. Análise de sensibilidade. Índice PMV.

Abstract

The HVAC control systems based on thermal comfort indices, in contrast with approaches that consider only temperature and humidity, provide advantages such as the improvement of the thermal quality of the built environment. Among several thermal comfort indices, the Fanger's model (PMV) is of paramount importance. However, the attainment of this index in real equipment is considerably difficult, due to the difficulty of measuring the mean radiant temperature, and determining individual parameters such as the human metabolic rate and the thermal resistance of human clothing. Due to those difficulties, adjustments and adaptations must be carried out and, consequently, there are errors related to these three parameters. This article proposes a sensitivity analysis of PMV, based on those three variables, through simulation. For each analysis, the behaviour of the model is analysed for different values of temperature, air velocity and relative humidity, and also for different values of the analyzed parameter. It is also important to obtain the relative importance of each parameter of Fanger's model, independently of units and analyzed values. Based on the Monte Carlo statistical method, a sensitivity analysis has been conducted, not only for the three cited variables, but also for all six Fanger's model parameters. As a result, a sensitivity vector is presented, whose values are dimensionless and independent of the variables and parameters, considering all possible combinations. Moreover, new comfort regions are presented, considering also individual factors.

Keywords: Thermal comfort. Comfort region. Sensitivity analysis. PMV index.

Rodrigo Trebien
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do
Paraná
Rua Imaculada Conceição, 1155
Curitiba - PR - Brasil
CEP 80215-901
Tel.: (41) 8803-3217
E-mail: rtrebien@yahoo.com.br

Nathan Mendes
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do
Paraná
Tel.: (41) 3271-1322
Fax: (41) 3271-1691
E-mail: nathan.mendes@pucpr.br

Gustavo H. C. Oliveira
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Sistemas
Pontifícia Universidade Católica do
Paraná
Tel.: (41) 3271-1330
Fax: (41) 3271-1333
E-mail: gustavo.oliveira@pucpr.br

Recebido em 02/02/07
Aceito em 10/09/07

Introdução

A criação de um ambiente com conforto térmico ainda é um importante parâmetro nos projetos de edificações. O estabelecimento de conforto térmico em edificações é a principal tarefa dos equipamentos de controle de sistemas de climatização. Como exemplo, se os ambientes de trabalho não oferecerem conforto térmico, o desempenho dos trabalhadores cairá drasticamente (INNOVA, 2005).

Conforto térmico é um conceito de difícil definição. Durante as últimas décadas, um grande número de índices de conforto térmico foi estabelecido, voltado à análise e projeto de sistemas de climatização (ASHRAE, 1993). Porém, o mais disseminado desses índices é o PMV (*Predicted Mean Vote*), proposto em Fanger (1970). Tal índice considera variáveis ambientais e fatores individuais e, quanto mais próximo de zero for o PMV, melhor será a sensação térmica dos ocupantes.

A equação de conforto térmico, derivada por Fanger, é complexa e tende a reproduzir com um bom grau de confiabilidade a sensação de conforto para a maioria das pessoas em ambientes. Para tanto, consideram-se como fatores ambientais a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a umidade e a velocidade do ar. Como fatores individuais, consideram-se o nível de atividade física e a resistência térmica da vestimenta dos ocupantes.

No entanto, apesar das vantagens que se obtêm ao utilizar essa modelagem de conforto, em detrimento de abordagens que incluam apenas temperatura ou ainda a umidade, existe uma dificuldade em se avaliar ou medir tal índice. Sensores para a medição de temperatura radiante média são, em relação a sensores de temperatura ou umidade, difíceis de ser obtidos ou inviáveis de ser incorporados em um sistema de controle de climatização. A temperatura radiante média pode ser estimada a partir da temperatura de um sensor do tipo globo, que deve estar presente no centro do ambiente em questão. Esse procedimento pode ser usado em sistemas experimentais, porém não tem a praticidade necessária para produtos comerciais e aplicações reais, além de prejudicar a qualidade estética dos ambientes. Mesmo que esse sensor estivesse presente no equipamento, na prática, considerando que as temperaturas das superfícies internas são diferentes, a sensação de conforto térmico, com relação à temperatura radiante média, seria diferente para cada posição desse ocupante no ambiente. Tal erro somente seria corrigido se o sensor fosse localizado exatamente na mesma posição do ocupante, a cada instante de tempo, e ainda se o formato do sensor fosse o mesmo do ocupante. Esse cenário é difícil de ser reproduzido, obrigando que algum ajuste sempre tenha que ser realizado. Portanto, a temperatura radiante média, no contexto

do cálculo do PMV, está entre os parâmetros mais difíceis de ser obtidos e está sujeito a grandes erros e incertezas. Uma contribuição a respeito de sensores para conforto térmico é dada em Kon (1994).

O índice de vestimentas em um sistema real é um parâmetro assumido constante ou determinado por um usuário. No entanto, é difícil que este tenha um conhecimento preciso do valor a ser atribuído a esse parâmetro. O usuário sabe a roupa que está usando, mas não conhece seu valor de resistência térmica. Uma melhor solução é fornecer um conjunto de opções com as quais, de acordo com aquela indicada pelo usuário, se alimenta o sistema de controle de condicionamento de ar com um valor correspondente. Um número finito de opções fornecidas para um usuário que pode vestir um número infinito de tipos de vestimentas faz com que um erro esteja presente no sistema. Erros também podem advir do fato de que diferentes integrantes de um ambiente podem vestir (ou certamente vestirão) roupas diferentes. Este último problema pode ser amenizado pelo fato de que, em geral, um ambiente desempenha determinado papel funcional (escritório, dormitório, sala de ginástica, etc.) e, portanto, as pessoas em seu interior tendem a vestir roupas parecidas no sentido da proteção térmica. Porém, apesar de parecidas, as roupas não são iguais, principalmente quando comparadas entre os ocupantes do sexo masculino e do feminino. Assim, algum nível de erro sempre estará presente e deve ser investigado.

O nível de atividade apresenta características semelhantes ao problema descrito para o parâmetro de vestimentas, com o agravante de que esse parâmetro tem uma variação maior de acordo com cada integrante presente no ambiente. Além da possibilidade de os integrantes do ambiente realizarem atividades diferentes em um mesmo momento (o que poderia ser amenizado, uma vez que, em geral, os ambientes têm uma função única), o nível de metabolismo corpóreo dos integrantes pode variar. Assim, pode-se afirmar que esse parâmetro não somente é de difícil obtenção devido à imprecisão (como ocorre com o nível de vestimenta), como é impossível de se obter de forma uniforme para um ambiente que possua mais de um ocupante.

Assim sendo, mesmo quando o índice PMV é determinado, não é possível ter certeza de quão fiel é o valor obtido em relação ao PMV real que o ambiente possui para determinado ocupante.

Nesse sentido, o presente trabalho possui como foco o problema da medição do PMV sob o ponto de vista de aspectos oriundos da dificuldade de obtenção da temperatura radiante média e de determinação dos índices de metabolismo e nível de vestimentas. Conhecendo essas dificuldades, para que se utilize a

estratégia de controle de climatização baseada em PMV, é fundamental conhecer o impacto que as adaptações e ajustes escolhidos causam na avaliação final do índice PMV. Esses resultados são relevantes no desenvolvimento de sensores para a avaliação de conforto térmico baseados em PMV, em particular sensores que trabalhem acoplados com equipamentos de controle de sistemas de climatização, em que um compromisso entre confiabilidade dos resultados e complexidade de montagem do sensor deve ser observado. Abordagens de controle do conforto térmico de ambientes são apresentadas em Freire (2006), Freire *et al.* (2005), Gouda, Danaher e Underwood (2001) e Hamdi e Lachiver (1999).

Assim sendo, é fundamental que se analise diretamente o efeito das incertezas na avaliação do conforto térmico. Em outras palavras, deve-se verificar a influência de variações dos três parâmetros citados da equação do PMV e descobrir como o índice se comporta com relação a essas variações. É possível, então, determinar derivadas do PMV em relação aos parâmetros avaliados. Como o foco da análise desses três parâmetros é a obtenção direta do impacto que os ajustes desses provocam no PMV, para a elaboração de sensores, os resultados obtidos (derivadas parciais) são expressos nas mesmas unidades de cada um dos parâmetros em questão e, para diferentes valores dos parâmetros analisados, dentro dos limites previstos. Também é importante que se apresentem resultados para diferentes valores de outros parâmetros não analisados, como temperatura, velocidade e umidade do ar. O objetivo é proporcionar maior entendimento em torno de assuntos como sensoramento do conforto térmico e do PMV.

Além da análise dos três parâmetros do modelo que estão mais sujeitos aos erros, para um perfeito entendimento do modelo de Fanger, é importante também uma análise de sensibilidade dos parâmetros, para que se possa observar o peso que cada variável possui na equação do PMV. Dessa forma, pode-se comparar, de forma fácil e direta, quais parâmetros são mais importantes no modelo e para quais o modelo é menos sensível. Para que essa comparação seja possível, deve-se obter como resultado valores correspondentes ao peso de cada parâmetro independentemente da unidade e sem discriminar diferentes valores do parâmetro ou

diferentes faixas dos demais parâmetros não analisados. Apesar da obtenção de um peso único, esse valor deve ser obtido como resultado das influências de todas as combinações dos parâmetros do modelo. Essa análise de sensibilidade é complementar à análise dos parâmetros temperatura radiante média, taxa de metabolismo humano e resistência térmica das vestimentas, além de abranger os seis parâmetros do modelo.

Revisão Bibliográfica

Modelo de Fanger para Conforto Térmico

A medição perfeita do conforto térmico em um ambiente ainda é um problema em aberto. O índice PMV (*Predicted Mean Vote*), adotado pela ISO, utiliza uma escala de sete divisões para a avaliação da sensação térmica, como visto na Tabela 1. Para que o ambiente tenha um conforto térmico, a ISO recomenda que o PMV esteja em $0 \pm 0,5$. O percentual de pessoas que não se sentem confortáveis termicamente é chamado de índice PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). A relação entre PPD e PMV pode ser vista na Tabela 1.

A sensação térmica é afetada por seis parâmetros. Os parâmetros ambientais são: temperatura do ar; temperatura radiante média; umidade; e velocidade do ar. Os parâmetros individuais são: atividade corpórea; e nível de vestimentas. O índice PMV é calculado levando-se em conta esses seis parâmetros, como mostrado na Equação 1.

$$PMV = \mathfrak{Z}(T_{ar}, T_{rm}, \phi, V_{ar}, MET, CLO) \quad (1)$$

onde:

ϕ : Umidade relativa (-);

CLO: Resistência térmica da vestimenta (clo);

MET: Taxa de metabolismo humano (met);

T_{ar} : Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

T_{rm} : Temperatura radiante média ($^{\circ}\text{C}$); e

V_{ar} : Velocidade do ar (m/s).

Para a obtenção do índice PMV, a Equação 1 é expandida, abrangendo outros parâmetros, relacionados aos seis citados anteriormente (Equação 2).

$$\begin{aligned} PMV = & \{0,303 \times e^{(-0,036 \times M)} + 0,28\} \times \{(M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6,99 \times (M - W) - p_r]\} \\ & - 0,42 \times [(M - W) - 58,15] - [1,7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_r)] - [0,0014 \times M \times (34 - T_{ar})] \\ & - \{3,69 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4]\} - [f_{cl} \times h_c \times (T_{cl} - T_{ar})] \end{aligned} \quad (2)$$

SENSAÇÃO TÉRMICA	PMV	PPD (%)
Muito quente	+3	100
Quente	+2	75
Pouco quente	+1	25
Neutralidade	0	5
Pouco frio	-1	25
Frio	-2	75
Muito frio	-3	100

Tabela 1 - PMV e PPD para cada uma das sensações térmicas

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028 \times (M - V) - 0,155 \times CLO \times \{3,96 \times 10^{-8} \times [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (T_{cl} - T_{ar})\} \quad (3)$$

$$h_c = 10,4 \sqrt{V_{ar}} \xrightarrow{\text{para}} V_{ar} < 2,6 \text{ m/s} \quad (4)$$

onde:

M: Metabolismo. 1 met = 58,15(Wm⁻²) (Wm⁻²);

W: Trabalho externo – igual a zero para a maioria das atividades (Wm⁻²);

f_{cl}: Razão da área do corpo completamente vestida com relação à área do corpo nu. Se CLO ≤ 0,5:

f_{cl} = (1 + 0,2CLO). Caso contrário: f_{cl} = (1,05 + 0,1CLO) (-);

p_v: Pressão parcial de vapor d'água (kPa);

h_c: Coeficiente de transferência de calor por convecção (Wm⁻²K⁻¹)

T_{cl}: Temperatura da superfície da vestimenta (°C)

Análise do PMV em Relação aos parâmetros T_{RM}, MET e CLO

Nesta seção é abordada a determinação das taxas de variação do PMV em relação aos três parâmetros discutidos na introdução, *i.e.*, T_{rm}, MET e CLO. Essas derivadas foram inspecionadas para três valores de temperatura do ar (17, 22 e 27 °C), dois de umidade relativa (30% e 80%) e de velocidade do ar (0 e 0,2 m/s). Ou seja, é realizada a combinação dessas faixas de operação, chegando-se a 12 combinações para cada uma das três análises de sensibilidade. Em cada combinação, os três parâmetros físicos são tratados como constantes para a geração de uma curva, e o parâmetro analisado (T_{rm}, MET ou CLO) é submetido a uma variação, dentro da faixa proposta.

A análise de sensibilidade de cada parâmetro tem como resultado um gráfico contendo as 12 curvas de variação do PMV com relação ao parâmetro analisado e a determinação da sua taxa de variação.

Em cada gráfico são encontradas 12 combinações de estilos de linhas (3 cores x 2 espessuras x 2 estilos) para as 12 combinações de faixas de operações (3 temperaturas x 2 umidades x 2 velocidades para o ar).

Comportamento do PMV em Relação à Temperatura Radiante Média

Conforme mencionado anteriormente, o parâmetro temperatura radiante média é difícil de ser determinado fora de condições de laboratório. Uma alternativa simples e sem custo é a seleção da temperatura radiante média como sendo igual à temperatura do ar. Caso a temperatura radiante média seja diferente, o índice PMV calculado será diferente daquele que está realmente ocorrendo no ambiente. Nesse sentido, é relevante determinar a taxa de variação do PMV com relação à diferença entre a temperatura radiante e a temperatura do ar. Essa taxa de variação é função das diferentes faixas de operação dos demais parâmetros físicos do ambiente, tais como temperatura, velocidade e umidade do ar.

O gráfico contendo curvas do valor do PMV em função da diferença entre a temperatura radiante média e a temperatura do ar, e para diferentes faixas de operação das condições ambientais, é apresentado na Figura 1.

A Figura 1 mostra que a taxa de variação do PMV em relação ao parâmetro analisado pode ser considerada praticamente constante, mesmo para condições ambientais diferentes (diferentes valores de T_{ar}, V_{ar} e Ø). Para T_{ar} = 18 °C, Ø = 0,3 e V_{ar} = 0,2 m/s, o PMV varia em uma unidade quando a T_{rm} é 8 °C acima da T_{ar}, enquanto o PMV decresce um pouco menos que uma unidade quando a T_{rm} é 8 °C abaixo da T_{ar}. Variações um pouco mais significativas aparecem quando a temperatura do ar é elevada. Mais detalhes podem ser visualizados na Tabela 2.

Na Tabela 2, verifica-se que realmente as derivadas têm valores muito próximos (entre 0,10 e 0,13), mesmo para diferentes valores de T_{ar} , V_{ar} e ϕ , e para diferentes valores da diferença entre T_{rm} e T_{ar} . Portanto, considerando-se o pior caso, pode-se aproximar o valor da derivada do PMV com relação à diferença entre T_{rm} e T_{ar} como sendo 0,13. Verifica-se na Tabela 2 que não estão presentes os resultados que diferenciam os valores das derivadas para $\phi=0,3$ e $\phi=0,8$. O motivo é que esses valores diferentes para ϕ não alteram o valor da derivada e essa discriminação foi retirada da tabela para facilitar a apresentação dos resultados.

Assim sendo, na hipótese de que no cálculo do PMV a temperatura radiante média é igual à temperatura do ar, pode-se considerar que, a cada 7,7 °C de diferença entre a temperatura radiante média real e a temperatura do ar, há um erro de uma unidade entre o PMV real e o PMV calculado. Nota-se também que erros positivos entre as temperaturas implicam erros positivos de PMV,

portanto o PMV real é maior que o calculado (e vice-versa).

Através deste resultado, pode-se concluir sobre a viabilidade de utilização da hipótese simplificadora na construção de um sensor de PMV para fins de sistemas de controle de conforto, muitas vezes necessária devido a restrições operacionais, que a temperatura radiante média é igual à temperatura do ar em ambientes onde os efeitos de troca de calor por radiação com o exterior têm reduzida importância na determinação da carga térmica. Nesse contexto, é desejável que o equipamento de controle determine o nível de potência do sistema de climatização a fim de que o PMV seja nulo. Considerando que valores de PMV na faixa de $\pm 0,5$ ainda são capazes de gerar conforto (ASHRAE, 1993), um equipamento de controle de conforto capaz de manter o PMV (medido no sensor) em zero efetivamente proporcionará conforto no ambiente térmico se a temperatura radiante média estiver em $\pm 3,9$ °C acima ou abaixo da temperatura do ar.

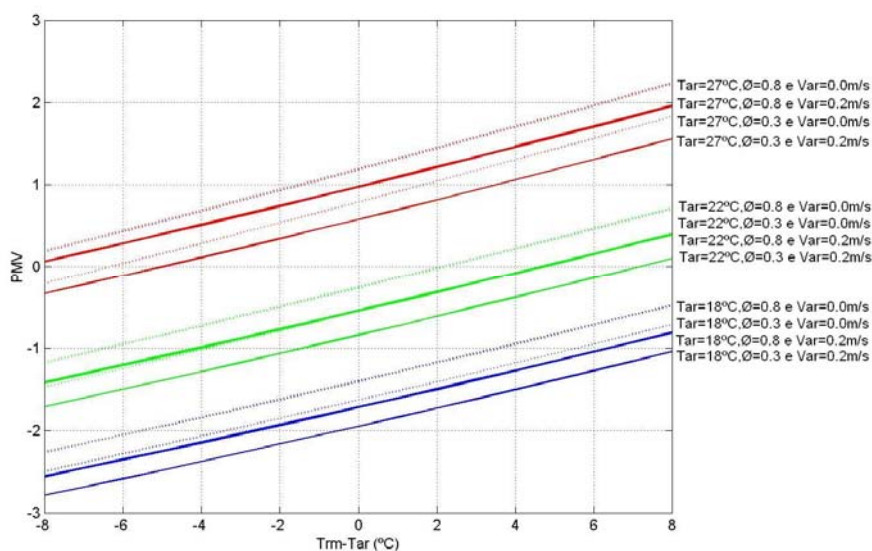


Figura 1 – Valor do PMV em função da diferença entre a temperatura radiante média e a temperatura do ar

Faixas de Valores		Derivadas do PMV em relação à diferença $T_{rm}-T_{ar}$								
T_{ar} (°C)	V_{ar} (m/s)	-8 °C	-6 °C	-4 °C	-2 °C	0 °C	2 °C	4 °C	6 °C	8 °C
18	0,0	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12
	0,2	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12
22	0,0	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	0,2	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
27	0,0	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,2	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13

Tabela 2 – Valores da derivada do PMV com relação à diferença $T_{rm}-T_{ar}$

Comportamento do PMV em Relação à Taxa de Metabolismo Humano (MET)

Como descrito anteriormente, o parâmetro MET tem por natureza uma imprecisão e incerteza alta quando aplicado a sistemas reais, e esses fatores são agravados para ambientes que possuam mais de um ocupante. Como algum nível de erro estará presente na obtenção desse parâmetro, é importante uma estimativa do impacto desse erro no valor final do PMV. As curvas de variação do PMV em relação ao MET podem ser vistas na Figura 2.

A Figura 2 indica que a derivada do PMV em relação ao MET não é constante e é maior para valores pequenos de MET. Porém, o gráfico mostra que, apesar de diferente para faixas de valores de MET, essa variação se mantém relativamente constante para as diferentes combinações de faixas de T_{ar} , V_{ar} e ϕ . Mais detalhes podem ser vistos na Tabela 3.

Por meio dessa tabela, pode-se comprovar que a derivada é maior para valores pequenos de MET e que, para os mesmos valores de MET, as derivadas tendem a ser parecidas para as 12 curvas, com algumas pequenas variações para valores diferentes de ϕ e V_{ar} . As diferentes faixas de operação do parâmetro T_{ar} provocam variações um pouco maiores na derivada do PMV com relação ao MET, com valores maiores da derivada para valores menores de T_{ar} . Ou seja, quando a temperatura do ar for menor, o PMV é mais sensível às mudanças no parâmetro MET do que para T_{ar} maiores, visto que as derivadas decrescem quando T_{ar} cresce.

Essas duas conclusões podem servir de direcionador dos projetos de controle de sistemas de climatização baseados no valor de PMV, nos quais o parâmetro MET deve ser atribuído pelo ocupante do ambiente. Visto que as derivadas parciais do PMV em relação à MET são maiores para valores baixos de MET, especialmente para valores entre 0,8 e 1,05, o PMV estimado terá erros maiores para diferenças no parâmetro MET que ocorram nessa faixa.

Um erro pode ocorrer quando um usuário escolhe uma opção para taxa de metabolismo humano e esta alimenta o sistema com o valor de MET correspondente. Esse erro é causado pela discretização de valores para MET (fornecimento de um grupo de valores de MET na forma de opções de atividades ao invés de o usuário atribuir um valor contínuo para esse parâmetro). Por exemplo, se o ocupante estiver realizando uma atividade com MET=0,95 em um sistema que oferece opções como vistas na Tabela 4, ele

deverá escolher a opção com MET=0,8 ou MET=1,2, ocorrendo um erro para qualquer dessas opções. Quanto menos opções, maiores serão os erros. Pode-se diminuir esse erro fazendo com que haja um maior número de escolhas para atividades com baixo MET do que para valores altos de MET.

Por exemplo, seja um sistema de controle baseado em PMV com um número finito de opções para seleção do MET. Um maior número de opções eleva a complexidade e o custo do sistema, porém um menor número de opções eleva os valores dos erros. Definiu-se, então, um sistema com oito opções para o usuário, que são convertidas em oito valores para o parâmetro MET. Inicialmente, escolhem-se seis opções, como visto na Tabela 4, com intervalos de aproximadamente 0,4 met entre as atividades. O critério usado para a escolha desses seis valores é que se atenda às principais atividades esperadas para um ambiente interno (valores entre 0,8 e 3,0 para MET). Porém, existem outras duas opções. Com as seis opções definidas, após a análise de sensibilidade para o parâmetro MET e a definição que as maiores derivadas encontram-se para valores pequenos de MET, sabe-se que o maior erro ocorreria caso a T_{ar} fosse mais baixa (ex.: 18 °C) e, principalmente, se o usuário estivesse realizando uma atividade com valor de MET entre 0,8 e 1,2. Considerando-se esses fatores, esse pior caso ocorre, por exemplo, quando o ocupante estiver realizando uma atividade que corresponda a um MET de 0,95. Caso o ocupante escolha a opção “Atividade em Escritório (sentado)” (1,2 met), por não encontrar a opção correta, os erros relativo e absoluto para a avaliação do PMV seriam iguais a 52,84% e 1,02.

Caso o ocupante do ambiente escolha a opção “Dormindo”, novamente por não encontrar a opção correta, os erros absoluto e relativo do PMV seriam -1,06 e -54,98%, respectivamente.

Portanto, os erros para o PMV, devido à imprecisão na determinação do parâmetro MET, são maiores que o permitido para o índice, que é de $\pm 0,5$, e tornam o sistema, com esse conjunto de opções, inviável.

Com a adição das duas opções para MET, justamente na faixa de valores que apresentam a maior derivada, poder-se-ia definir, por exemplo, opções para a taxa de metabolismo humano correspondentes a 0,9 met e 1,0 met. Nesse caso, para o mesmo ocupante com uma taxa de metabolismo igual a 0,95, caso escolha a opção referente a 1,0 met, os erros absoluto e relativo seriam de 0,32 e 16,32%, respectivamente. Caso o ocupante escolha a opção que corresponde a

MET=0,9, os erros absoluto e relativo seriam -0,36 e -18,36%. Poderiam também ser escolhidos, para as duas novas opções, os valores 1,0 e 1,4, contemplando também a faixa entre 1,2 e 1,6, que ainda apresenta uma derivada do PMV com relação ao MET elevada.

Esses resultados indicam que um sistema de medição de PMV baseado na seleção de valores discretos de MET tende a ser mais preciso se essa

discretização for feita com mais valores em níveis baixos de MET.

Como os erros causados por imprecisões e incertezas na obtenção do parâmetro MET sempre estarão presentes em sistemas reais, o uso da análise de sensibilidade proporciona melhorias nos projetos dos sistemas para que tais erros, se não eliminados, possam ser reduzidos e façam com que o uso do PMV na estratégia de controle de sistemas de climatização seja viável.

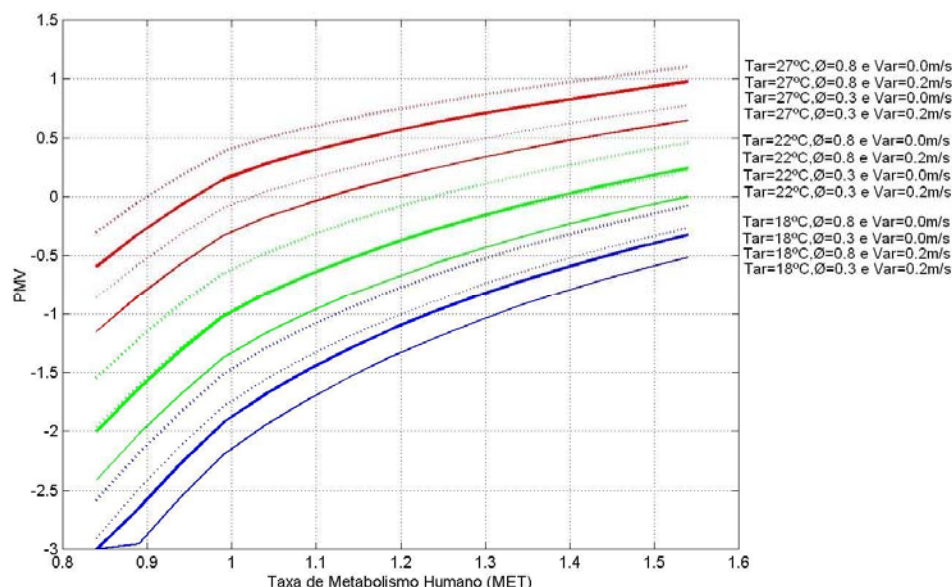


Figura 2 – Valor do PMV em função da taxa metabólica

Faixas de Valores			Derivadas em sete valores para MET						
T _{ar} (°C)	Ø	V _{ar} (m/s)	0,90 (met)	1,00 (met)	1,10 (met)	1,20 (met)	1,30 (met)	1,40 (met)	1,50 (met)
18	0,3	0,0	7,67	5,28	3,59	2,91	2,41	2,02	1,74
		0,2	8,27	5,77	3,98	3,24	2,67	2,23	1,91
	0,8	0,0	7,35	5,02	3,38	2,74	2,27	1,91	1,64
		0,2	7,96	5,51	3,77	3,06	2,53	2,12	1,82
22	0,3	0,0	6,55	4,37	2,85	2,32	1,92	1,63	1,42
		0,2	7,11	4,82	3,22	2,62	2,17	1,83	1,58
	0,8	0,0	6,15	4,04	2,58	2,10	1,75	1,49	1,30
		0,2	6,71	4,49	2,95	2,40	1,99	1,68	1,47
27	0,3	0,0	5,26	3,32	2,00	1,63	1,36	1,17	1,04
		0,2	5,65	3,63	2,26	1,83	1,53	1,31	1,16
	0,8	0,0	4,71	2,87	1,63	1,33	1,12	0,98	0,90
		0,2	5,10	3,19	1,89	1,54	1,29	1,12	1,01

Tabela 3 – Valores da derivada do PMV em relação à Taxa de Metabolismo Humano (MET)

Descrição da Atividade	Valor de MET
Dormindo	0,8
Atividade em escritório (sentado)	1,2
Aula ou a apresentação (em pé)	1,6
Trabalho manual	2,0
Trabalho manual pesado	2,4
Trabalho doméstico leve	2,9

Tabela 4 – Valores de MET

Comportamento do PMV com Relação à Resistência Térmica da Vestimenta (CLO)

O parâmetro relacionado com a resistência térmica da vestimenta (CLO) tem por natureza uma imprecisão e incerteza quando aplicado em sistemas reais, e esses fatores são agravados para ambientes que possuem mais de um ocupante. Como algum nível de erro estará presente na determinação desse parâmetro, é importante a determinação do impacto desse erro no valor final do PMV. A Figura 3 apresenta a sensibilidade do PMV em relação ao parâmetro CLO.

A Figura 3 indica que a derivada do PMV em relação ao parâmetro CLO (ou em relação ao erro entre o CLO real e aquele indicado pelo usuário do sistema) não varia tanto como em relação ao MET. Porém, nota-se que a derivada não é exatamente constante e que pode variar com relação às faixas de operação de T_{ar} , ϕ e V_{ar} . As derivadas da Figura 3 são apresentadas na Figura 4.

Através da Figura 3 e da Figura 4, nota-se que as derivadas do PMV em relação ao CLO crescem com a diminuição do CLO. Esse fato pode auxiliar em projetos de sistemas que se baseiam na determinação do PMV, da mesma forma que foi descrito para a análise do parâmetro MET. Considerando-se essa informação nos projetos, pode-se fornecer para o usuário do sistema mais opções de vestimentas que correspondam a valores baixos de CLO, e assim a redução de erros na obtenção do parâmetro CLO será mais significativa do que adicionar mais opções correspondentes a valores elevados de CLO. A ideia de valores do parâmetro CLO para alguns tipos de vestimentas pode ser obtida com a Tabela 5.

A segunda conclusão é que as derivadas tendem a ser um pouco maiores para V_{ar} maiores, e bem maiores para T_{ar} menores. Isso indica que a equação de Fanger para o PMV é mais sensível às mudanças no nível de vestimentas para temperaturas baixas e para velocidades do ar maiores. Esse fato é consistente com o senso comum, pois, por exemplo, quanto maior o nível de vestimenta de uma pessoa, menos o escoamento de ar atua em seu corpo e, portanto, menos influencia em seu conforto térmico.

As variações na umidade, apesar de terem uma influência no valor do PMV (mesmo que pequenas), como visto na Figura 3, não tiveram influência perceptível nos valores das derivadas do PMV em relação ao CLO. Esse fato pode ser visto pela Figura 4, onde as diferentes faixas de operação de umidade estão sobrepostas.

Como para cada curva da Figura 4, T_{ar} , V_{ar} e ϕ são constantes e o único parâmetro que varia é CLO, o valor positivo da derivada parcial indica que o PMV cresce com o CLO, o que é consistente com a formulação do PMV. Portanto, a terceira conclusão é que o sinal positivo da derivada indica que o PMV calculado para o sistema, com a limitação de sua obtenção, é maior que o PMV real do ambiente, caso o CLO real seja menor que o CLO indicado pelo usuário (ou pelo valor de CLO traduzido a partir da opção indicada pelo usuário). Portanto, o PMV possui um valor maior quanto maior é o nível de vestimenta do ocupante do ambiente, o que é compatível com a teoria do PMV.

A quarta conclusão é que, apesar de diferentes valores para a taxa de variação do PMV em relação ao parâmetro CLO, estes não são elevados, indicando que erros no parâmetro CLO ocasionam erros médios na determinação do PMV. No gráfico da Figura 4, o maior valor encontrado para a derivada (entre os valores obtidos neste experimento) é de 3,39.

Esse fato é importante para a validação do uso do PMV para o controle de sistemas HVAC, pois indica que, se um erro de $\pm 0,5$ em torno do $PMV=0$ é permitido para o PMV, pode-se errar, na pior das hipóteses, no parâmetro CLO em 0,16. Mas essa situação ocorre em faixas de operação não usuais para ambientes fechados, como baixa temperatura e alta velocidade do ar, e, ainda, para uma pessoa presente nesse cenário com um baixo nível de vestimenta. Para os demais casos, mais adequados com a realidade, as derivadas estão entre 1,16 e 2,5, o que permite um erro de 0,43 e 0,2, respectivamente, na determinação do parâmetro CLO.

Resultados baseados no modelo de Fanger (Figuras 1, 2 e 3) mostraram que uma variação em T_{ar} tem uma influência muito maior que aquelas provocadas

por variações nos outros dois parâmetros (V_{ar} e θ). Assim, as curvas com a mesma faixa de T_{ar} se encontram próximas.

Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de Fanger através do método estatístico de Monte Carlo

Uma vez que há um modelo matemático que expressa o comportamento de um sistema, pode-se utilizar esse modelo como uma espécie de “bancada numérica” capaz de permitir, dentro da faixa em que a validação foi feita, ensaiá-lo nas mais diversas situações, de maneira rápida, econômica e segura.

Nesta seção, faz-se uso dessa possibilidade para realizar a análise de sensibilidade dos seis parâmetros do modelo de Fanger, utilizando-se o método estatístico de Monte Carlo para a obtenção do Vetor de Sensibilidade Adimensional. Este vetor apresenta valores comparativos do peso que cada parâmetro possui no modelo de Fanger, independentemente de unidades, faixas de operação do parâmetro analisado e dos parâmetros não analisados. O peso é determinado, sim, analisando-se a combinação de todos os possíveis valores para os parâmetros.

Metodologia

Denomina-se, genericamente, de método Monte Carlo qualquer procedimento que envolva processos de amostragem, por meio de números aleatórios, para se chegar a soluções aproximadas de um problema físico ou matemático. O processo utilizado aqui para se determinar a sensibilidade do índice PMV (variável dependente) em relação às seis variáveis independentes baseia-se nesse método, que já foi utilizado com sucesso por Duarte (1994). Com ele, pretende-se verificar a quais variáveis independentes do sistema o modelo de Fanger é mais sensível.

O primeiro passo da análise é a obtenção dos limites de cada parâmetro p_j , para os quais o modelo é válido. Em Ashrae (2006), os limites para o parâmetro umidade, para que um desconforto térmico não ocorra, são discutidos. Esses limites foram adotados nesta análise limitada a valores de velocidade de ar de 0,2 m/s, o que é consistente com padrões estipulados pela *ASHRAE STANDARD 55* (1981). Esses valores e aqueles referentes aos demais parâmetros podem ser verificados na Tabela 6. Com relação aos limites para a diferença entre T_{rm} e T_{ar} , adotou-se o maior valor aceitável para que haja conforto em um sistema que mantenha o PMV em 0, *i.e.*, ($|PMV| > 0,5$) e que considere T_{rm} igual a T_{ar} .

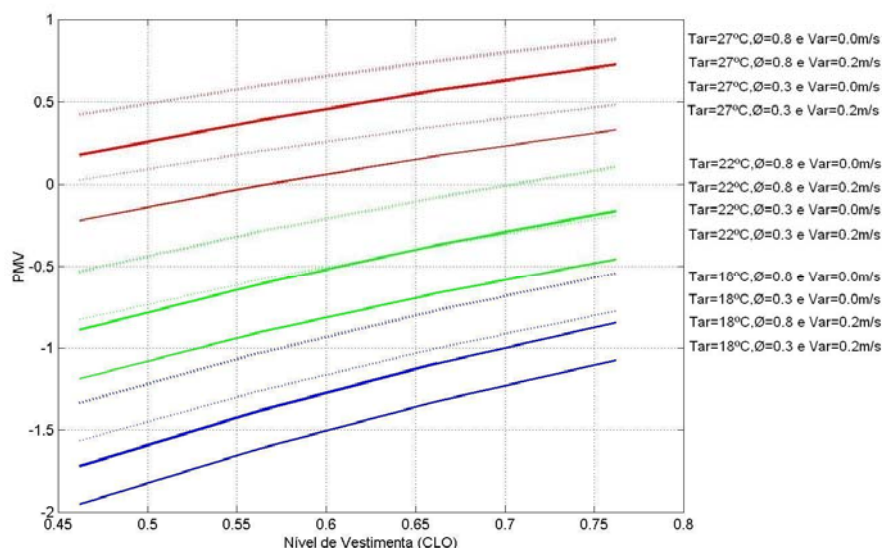


Figura 3 – Valor do PMV em função do parâmetro CLO

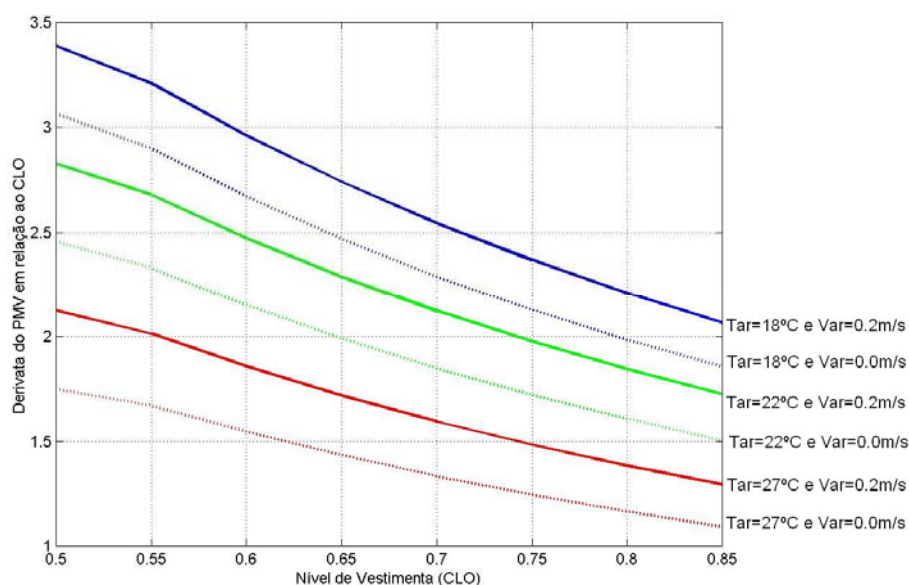


Figura 4 – Derivada do PMV em função do parâmetro CLO para diferentes valores de T_{ar} , $\varnothing$ e V_{ar}

Descrição da Vestimenta	Valor do CLO
Bermuda	0,15
Saia curta + blusa	0,50
Vestido curto	0,50
Macacão de mecânico	0,80
Terno + gravata	1,00
Casaco longo de lã	1,20

Tabela 5 – Valores de CLO

Parâmetro	Limite Inferior	Limite Superior
T_{ar}	18,0 °C	30,0 °C
$T_{rm}-T_{ar}$	-4,0 °C	4,0 °C
$\varnothing$	30,0%	70,0%
V_{ar}	0,00 m/s	0,20 m/s
MET	0,80 met	3,0 met
CLO	0,30 clo	1,15 clo

Tabela 6 – Limites de cada parâmetro do modelo de Fanger

Com os limites de cada parâmetro definidos, o segundo passo é obter uma matriz de valores aleatórios (v_{ij}). Para essa análise em particular, a matriz possui seis colunas, referentes aos seis parâmetros do modelo de Fanger. Portanto, o índice j varia de 1 a 6. Cada linha corresponde a um conjunto particular de valores para o modelo, atribuídos a cada parâmetro (cada coluna da matriz). A cada nova linha, uma nova combinação dos parâmetros do modelo é obtida, pois todos os parâmetros são alterados. A busca desses valores aleatórios pode ser obtida, com uma distribuição

normal ou uniforme, respeitando-se os limites definidos. Dessa forma, atende-se a uma das motivações dessa análise, que é a possibilidade de comparar a sensibilidade do PMV com relação aos seis parâmetros, considerando-se todas as possíveis combinações desses parâmetros. Sabe-se que é impossível obter todas as combinações, mas pode-se chegar a uma aproximação dessa situação com resultados excelentes. Quanto maior o número de linhas dessa matriz de números aleatórios, maior é a combinação de valores realizada para a determinação da sensibilidade de cada parâmetro.

Portanto, escolheu-se um número elevado de linhas (1.500), fazendo com que o índice i variasse de 1 a 1.500. Para a análise do T_{rm} , serão gerados valores aleatórios para esse parâmetro, de modo que a diferença entre T_{rm} e T_{ar} não passe dos limites vistos na Tabela 6. Dessa forma, evitam-se situações não reais, como T_{ar} igual a 30,0 °C ou T_{rm} igual a 10,0 °C. Mas essa consideração é adotada apenas para a geração de números aleatórios. Esse valor gerado ($T_{rm}-T_{ar}$) é somado a T_{ar} nessa combinação para que se chegue ao valor presente na coluna de T_{rm} . Portanto, para a matriz v_{ij} gerada na coluna referente ao parâmetro T_{rm} , têm-se valores para T_{rm} , e não para $T_{rm}-T_{ar}$.

O terceiro passo é a obtenção dos incrementos que cada valor aleatório irá possuir, para que as derivadas parciais possam ser determinadas. Deve-se obter uma segunda matriz, com o mesmo número de linhas e colunas que a matriz de números aleatórios (1.500x6), pois cada posição dessa matriz corresponde ao incremento que cada um dos valores da matriz de números aleatórios deve possuir. A determinação desse incremento deve ser criteriosa, pois ele deve ser tão pequeno quanto possível (pela teoria da derivada, o incremento deve tender a zero), embora haja limitações devido ao truncamento numérico. Foi utilizada a regra de Brown e Dennis (*apud* DUARTE, 1994), onde $PMV(i)$ é o valor do PMV para os parâmetros da linha i (Equação 5).

$$\Delta v_{ij} = \min \{ \|PMV(i)\|; \delta_{ij} \}, \quad (5)$$

onde:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 10^{-9} & se \|v_{ij}\| \leq 10^{-6} \\ \|v_{ij}\| \times 10^{-3} & se \|v_{ij}\| > 10^{-6} \end{cases}$$

O quarto passo é a obtenção de uma matriz com as derivadas parciais do PMV com relação aos seis parâmetros, para todas as linhas das matrizes v_{ij} e Δ_{ij} . Essa nova matriz tem o mesmo número de linhas e colunas das matrizes obtidas anteriormente, pois ela indica, para cada linha, as derivadas parciais do PMV com relação a cada parâmetro (cada coluna). O cálculo de cada derivada parcial é realizado segundo a Equação 6. O PMV ($i + \Delta_{ij}$) é o PMV calculado com os valores da linha i , com exceção do parâmetro j , que é incrementado com o valor Δ_{ij} .

$$S_{ij} = \frac{\partial PMV}{\partial v_{ij}} = \frac{PMV(i + \Delta_{ij}) - PMV(i)}{\Delta_{ij}} \quad (6)$$

Como mencionado, o objetivo é obter uma análise de sensibilidade independente de unidades ou grandeza. Por esse motivo, o quinto passo é a adimensionalização da matriz de derivadas parciais (S_{ij}), mediante a Equação 7, obtendo-se a matriz SA_{ij} .

$$SA_{ij} = S_{ij} \times \frac{v_{ij}}{PMV(i)} = \frac{\partial PMV}{\partial v_{ij}} \times \frac{v_{ij}}{PMV(i)} \quad (7)$$

A matriz SA_{ij} possui valores das derivadas parciais dos seis parâmetros do modelo de Fanger, de forma adimensional, para as i diferentes combinações desses parâmetros. O último objetivo dessa análise é que os valores de sensibilidade, apesar de considerar as diferentes combinações dos seis parâmetros do modelo de Fanger, sejam apresentados de forma independente dessas combinações ou de faixas de valores específicas. Ou seja, que se obtenha um único “peso” para cada um dos seis parâmetros. Esse requisito é obtido no sexto e último passo do método, somando-se as i linhas de cada um dos j parâmetros da matriz SA_{ij} e obtendo-se o vetor sensibilidade, conforme a Equação 8.

$$Sensibilidade_j = \sum_i SA_{ij} \quad (8)$$

Como visto, a matriz S possui, em cada uma de suas posições, derivadas parciais dependentes das unidades de cada parâmetro. A matriz SA possui valores adimensionais. Já o vetor de sensibilidade possui valores que não podem ser classificados como derivadas, pois foi obtido somando-se as linhas da matriz S . Como SA_{ij} representa derivadas, ao se somarem duas linhas, seria obtida a influência da derivada dessas duas linhas, e não a soma das derivadas. Portanto, a correta análise do vetor de sensibilidade não deve ser feita pelo valor individual de cada uma de suas colunas, mas sim pela comparação dos valores de suas colunas. Cada um de seus valores representa o peso que o parâmetro possui no modelo de Fanger com relação aos demais parâmetros (demais valores das outras colunas). Como os valores do vetor sensibilidade tendem a ser muito grandes, se um número elevado de linhas for utilizado, deve-se ter números elevados, mesmo para um parâmetro de peso pequeno no modelo, em comparação com os demais parâmetros. Para evitar essa falsa impressão, será dividido todo o vetor pelo menor valor do vetor. Dessa forma, o menor peso do vetor será 1,0, e os demais valores representam quantas vezes esses parâmetros são mais influentes no modelo, comparando com esse menor peso.

O segundo passo da metodologia, referente à obtenção da matriz valores aleatórios, indica que esses valores podem ser obtidos a partir de uma distribuição normal ou uniforme. Serão realizadas duas análises, uma utilizando-se a distribuição normal e outra, uma distribuição uniforme, obtendo-se dois vetores de sensibilidade, o que possibilita a comparação dos resultados. A distribuição uniforme tem como limites de cada parâmetro os valores da Tabela 6. A distribuição

normal tem como centro da curva o valor médio dos limites de cada parâmetro (Tabela 6) e o desvio padrão assumido como um terço da diferença entre os limites de cada parâmetro e o centro da curva. Dessa forma, espera-se que 99% dos valores estejam presentes nos limites vistos na Tabela 6.

Resultados

De acordo com a metodologia, realizaram-se os seis passos do método estatístico de Monte Carlo, para análise de sensibilidade do modelo de Fanger. Os coeficientes de sensibilidade, obtidos através do vetor de sensibilidade, para distribuição normal e uniforme, podem ser vistos na Tabela 7.

Nos dois experimentos, verifica-se que o parâmetro com maior peso no modelo de Fanger é T_{ar} , seguido de MET e T_{rm} . Pequenas mudanças nesses valores provocam grandes mudanças no PMV. Nos dois casos, os parâmetros que denotaram menor influência são ϕ e V_{ar} , sendo este último o parâmetro que possui o menor peso no modelo para a faixa analisada. Verifica-se que, apesar dos valores diferentes, para as duas distribuições, a relação de pesos entre os parâmetros é semelhante.

Esses resultados indicam a importância da análise individual realizada para os parâmetros T_{rm} , MET e CLO, pois, além da incerteza na obtenção desses parâmetros, eles possuem um grande peso no modelo. Uma variação pequena nesses parâmetros provoca uma grande mudança no PMV. Então, é importante considerar as informações obtidas no estudo das derivadas parciais desses três parâmetros, como os limites de erros aceitáveis, para que o PMV se mantenha dentro da faixa de conforto, e para quais faixas desses parâmetros o modelo é mais sensível.

Por outro lado, verifica-se que o modelo de Fanger é pouco sensível a V_{ar} . Apesar de não serem necessárias grandes adaptações para a obtenção desse parâmetro (como ocorre para os três parâmetros analisados individualmente), o sensor da V_{ar} pode ser caro. Considerando esse custo e com a informação obtida nessa análise de sensibilidade, pode-se *a priori* simplesmente eliminar o sensoramento desse parâmetro. Porém, o senso comum é conflitante com o resultado obtido quanto ao peso extremamente pequeno que o parâmetro V_{ar} possui no modelo de Fanger. Esse fato é ainda mais intensificado em países tropicais, onde o uso de um ventilador, que ocasiona um aumento em V_{ar} , pode alterar significativamente a sensação de conforto térmico. Mas em uma análise mais aprofundada, verifica-se que não há conflito entre o sentimento comum e os resultados obtidos.

O que ocorre é que, apesar de muito pequeno o peso para o parâmetro V_{ar} para a faixa analisada, a mudança nesse parâmetro, ao se utilizar um ventilador, é muito grande. Deve-se ainda considerar que a intensidade dessa sensação se deve, principalmente, às experiências para o indivíduo que está presente diretamente no fluxo do ar, onde a mudança do parâmetro V_{ar} é mais acentuada (podendo variar bruscamente).

Contudo, sistemas de climatização devem ser projetados de forma que o escoamento de ar não promova velocidades acima de 0,25 m/s no verão ou de 0,15 m/s no inverno, independentemente dos gradientes espaciais de velocidade presentes no ambiente (ASHRAE, 1981). Essas constatações são também discutidas por Bin e Sekhar (2006), que executaram simulações da dinâmica dos fluidos em ambientes climatizados.

Portanto, para esse cenário, mesmo que o sensoramento da V_{ar} seja realizado, o controle do PMV não necessariamente usaria essa velocidade máxima, e sim aquela presente no(s) local(ais) monitorado(s). A T_{ar} , ao contrário, possui o maior peso no modelo e, portanto, é capaz de alterar significativamente o índice para pequenas alterações nesse parâmetro. Mas, em geral, esse parâmetro sofre mudanças muito pequenas em seu valor em um curto espaço de tempo, contrariamente ao que ocorre com V_{ar} .

Vale ressaltar ainda que o uso de sistemas de condicionamento de ar provoca uma grande variação espacial não só da velocidade do ar, como também da umidade e, principalmente, da temperatura, que é o parâmetro predominante do modelo de Fanger.

A região de conforto

As cartas psicrométricas são ferramentas muito aplicadas para projetos de climatização, especialmente quando os equipamentos utilizam uma estratégia de controle que considera a região de conforto presente nessas cartas. Porém, essas regiões de conforto são determinadas analisando-se apenas parâmetros físicos do ambiente que determinam o estado termodinâmico do ar. Esse fato é conflitante com a proposição de Fanger para conforto térmico, por não abordar fatores individuais, como taxa de metabolismo humano e resistência térmica da vestimenta dos ocupantes do ambiente (ASHRAE, 1993). Pelas análises de sensibilidade desses dois parâmetros, verificou-se que o PMV poderá assumir valores totalmente diferentes para diferentes valores desses parâmetros individuais. Como consequência, é mais adequado determinar uma região de conforto térmico em função da temperatura e da umidade,

considerando-se adicionalmente parâmetros individuais.

Portanto, regiões de conforto que consideram fatores individuais, como taxa de atividade corpórea e nível de resistência térmica da vestimenta, serão propostas em gráficos temperatura/umidade, os quais podem ser superpostos em cartas psicrométricas. Ou seja, a região de conforto é definida para os pontos cujo conjunto de parâmetros combinados resulte em um $PMV = 0 \pm 0,5$. Adota-se o valor constante 0,01 m/s para a velocidade do ar, que é um valor compatível com ambientes internos sujeitos a um sistema de controle.

A T_{rm} será considerada igual a T_{ar} devido à viabilidade dessa simplificação mostrada na análise realizada no capítulo Comportamento do PMV em Relação à Temperatura Radiante Média. Escolheu-se um escritório como cenário para as análises, ou seja, supondo que seja necessária uma estratégia de controle que garanta conforto para esse local. Portanto, são realizadas regiões de conforto para atividades físicas e níveis de vestimentas que se espera encontrar nessa situação. A obtenção de cada região é determinada realizando-se a combinação de valores da T_{ar} e ϕ . Vale lembrar que a variação realizada para a temperatura do ar provoca, para efeito de cálculo do PMV, uma variação na temperatura radiante média.

Quanto às faixas de valores dos parâmetros, restringiu-se ϕ entre 30% e 70%, pois valores de umidade relativa fora dessa faixa provocam desconforto térmico (ASHRAE, 2006). Utilizando essa metodologia, serão realizadas duas análises.

A primeira análise tem como objetivo a obtenção de duas diferentes regiões de conforto para um mesmo nível de atividade física e, portanto, esse parâmetro é mantido constante. O valor da taxa metabólica para atividade em escritório é igual a 1,2 met. Em um escritório, podem estar presentes ocupantes com diferentes tipos de vestimentas. Os casos extremos que se espera encontrar, nesse cenário, são vestimentas com resistência térmica = 0,5 clo e 1,0 clo, que correspondem a tipos de vestimentas vistas na Tabela 5. O gráfico temperatura/umidade proposto, com as duas regiões obtidas nessa análise, pode ser visto na Figura 5.

A segunda análise é realizada para determinado nível de vestimenta constante. O nível escolhido foi 1,0 clo, compatível com um escritório, como visto na Tabela 5. Para este caso são determinadas duas regiões de conforto, para duas diferentes atividades físicas que se esperam encontrar em um escritório. São elas “Atividade em escritório (sentado)” e “Apresentação (em pé)”, que possuem valores de taxa metabólica iguais a 1,2 e 1,6 respectivamente (Tabela 4). O resultado desta análise pode ser verificado na Figura 6.

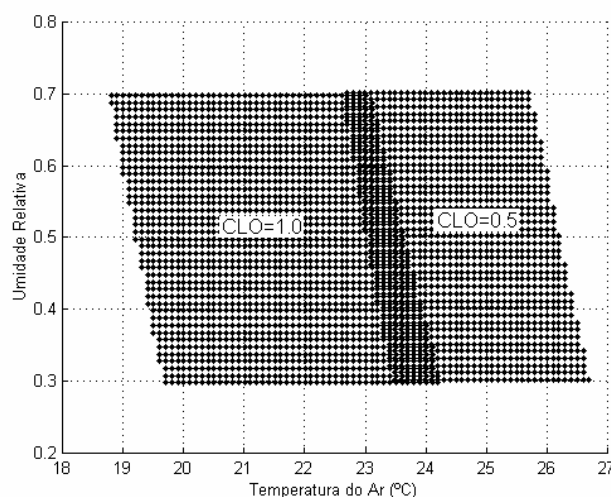


Figura 5 - Regiões de conforto para uma taxa de metabolismo humana (MET)=1,2

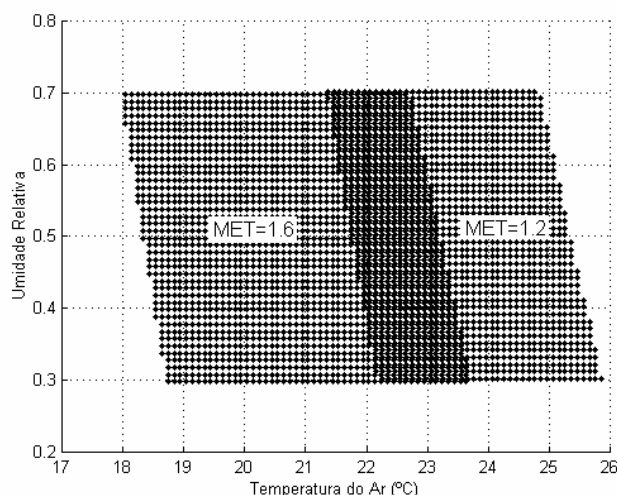


Figura 6 – Regiões de conforto para vestimentas com resistência térmica de 1,0 clo

	Parâmetros					
Distribuição	T _{ar}	T _{rm}	Ø	V _{ar}	MET	CLO
Normal	18,60	14,07	1,63	1,00	16,27	6,33
Distribuição	20,80	15,52	1,92	1,00	16,48	6,62

Tabela 7 – Coeficientes de sensibilidade

Nos dois gráficos temperatura/umidade verifica-se que, para a determinação das regiões de conforto, um valor maior de umidade proporciona conforto térmico para valores menores de temperatura, como ocorre em gráficos temperatura/umidade convencionais. Porém, verifica-se que os limites de valores de umidade e temperatura do ar para essas regiões são totalmente dependentes do valor da resistência térmica das vestimentas (Figura 5) e da taxa de metabolismo humano (Figura 6). Esse fato pode ser verificado claramente na Figura 5, pois, para os parâmetros adotados como constantes (V_{ar} e MET), as regiões de conforto (Figura 6) para um nível de vestimenta de 0,5 clo ficaram consideravelmente deslocadas da região de conforto para um nível de vestimenta de 1,0 clo, pois a área de intersecção das duas regiões de conforto é pequena. O mesmo pode ser observado na Figura 6. Nesse caso, a região de conforto para uma taxa de metabolismo humano de 1,2 met ficou consideravelmente deslocada da região de conforto para uma taxa de metabolismo humano de 1,6 met. Então, o resultado obtido por um sistema de controle que atuasse na temperatura, por exemplo, e que não considera o nível de vestimenta não seria satisfatório, ou seja, poderia não proporcionar conforto térmico em várias situações compatíveis com esse ambiente.

As duas análises sobre região de conforto não somente comprovam a importância de se considerarem aspectos individuais, como proporcionam uma nova alternativa para sistemas que realizam controle sobre regiões de conforto. Nesse caso, se o equipamento fornecer apenas opções para atividades físicas e se “Atividade em escritório” (Tabela 4) for a escolhida, por exemplo, a região a ser considerada deve ser formada pela intersecção das regiões de conforto da Figura 5. Por outro lado, o equipamento poderia apenas fornecer opções de vestuário e, nesse caso, se a opção “Terno e gravata” fosse a escolhida, por exemplo, a região a ser considerada no controle seria formada pela intersecção das regiões de conforto da Figura 6. Em ambos os casos, cada opção do usuário poderia alimentar o controlador com uma região de conforto obtida pela intersecção de tipos de vestuários esperados para uma atividade escolhida, ou pela intersecção de regiões de conforto para atividades físicas compatíveis com a vestimenta escolhida, respectivamente, e é necessário apenas o sensoriamento da T_{ar} e de ϕ . Em ambos os casos, a estratégia de controle baseia-se em regiões de controle obtidas pelo modelo de Fanger.

Por fim, se os valores de vestimenta e atividade física fossem mais próximos do que aqueles

apresentados, seria possível obter uma nova região de conforto, dada pela intersecção das quatro regiões anteriores, indicando uma relação de temperatura e umidade relativa capazes de gerar conforto para ocupantes do ambiente “Escritório”. Nesse caso, não seria necessário que os indivíduos indicassem sua vestimenta ou atividade física, pois essa região de conforto seria restritiva o suficiente para promover um PMV entre -0,5 e 0,5 para todas as combinações de vestimentas e atividades esperadas em um escritório. A grande vantagem é que essa seria a forma mais simples e barata de se utilizar o PMV para controle de sistemas de climatização, pois apenas seria necessário monitorar T_{ar} e ϕ .

Conclusões

O presente artigo analisou o modelo de Fanger, conhecido como PMV, sob três aspectos. O primeiro é relativo ao comportamento do índice PMV em função de imprecisões nos parâmetros T_{rm} , MET e CLO. O segundo utilizou o método estatístico de Monte Carlo para a realização de uma análise de sensibilidade sobre a importância dos parâmetros da equação do PMV. O terceiro utilizou o modelo de Fanger para elaboração de regiões de conforto, fazendo, com que estas considerem também fatores individuais.

As análises de sensibilidade permitem um conhecimento objetivo da influência dos parâmetros analisados no PMV. Dentro das faixas de operação utilizadas nas análises, conclui-se que a taxa de variação do PMV com relação à temperatura radiante média é aproximadamente constante e igual a 0,13. Para a possível simplificação de que a temperatura radiante média seja igual à temperatura do ar, esta derivada provoca um erro de aproximadamente uma unidade no PMV a cada 7,7 °C de erro nesse ajuste. Conclui-se também que a taxa de variação do PMV com relação aos fatores individuais (CLO e MET) não é linear. Quanto menor a faixa de operação da temperatura do ar e, principalmente, quanto menor o valor desse parâmetro individual, maior é o valor da derivada. As informações obtidas nas análises de sensibilidade dos três parâmetros são importantes para a adoção do PMV como variável de controle, pois permite não somente avaliar a viabilidade de determinados ajustes – como para a temperatura radiante média igual à temperatura do ar – como servir de diretriz para projetos de sistemas de climatização, como, por exemplo, na distribuição de valores fornecidos para os fatores individuais, dando prioridade, ou detalhando, valores menores desses parâmetros.

A manutenção da unidade do parâmetro analisado é muito importante na análise dos três parâmetros,

realizada no capítulo Análise do PMV em Relação aos parâmetros T_{RM} , MET e CLO, pois, dessa forma, pôde-se ter, de forma direta, o impacto dos ajustes no parâmetro em questão. Por exemplo, concluiu-se que, para se manter o PMV na faixa de $\pm 0,5$, a T_{rm} deve estar em $\pm 3,9$ °C da T_{ar} . Com a manutenção das unidades, pode-se então diretamente investigar se o valor de 3,9 °C como limite da diferença entre o T_{rm} obtido e o real é viável para o ambiente a ser controlado. O mesmo ocorreu, por exemplo, para o parâmetro CLO, onde uma derivada parcial máxima de 3,4 foi encontrada para faixas compatíveis com um ambiente sujeito a um controle. De forma prática e direta, esses resultados são muito significativos, principalmente porque fornecem uma referência para cada caso particular de projeto de sistemas de climatização. Para alguns casos, pode ser mais difícil que a condição, que a diferença entre T_{ar} e T_{rm} , seja menor que 3,9 °C. Para outros casos, pode perfeitamente ser mais fácil atender a essa limitação, mas ser muito difícil garantir que um erro no parâmetro CLO esteja dentro do exigido para esse parâmetro. Porém, ao se propor uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de Fanger, é necessário obter resultados que comparem a sensibilidade do índice PMV com relação aos seus parâmetros, independentemente de quão difícil, ou não, é obter-se esse valor. Ou seja, deve-se fornecer uma comparação do comportamento do PMV com relação aos parâmetros independentemente de unidades, ou seja, de forma adimensional. Essa comparação pode ser realizada a partir dos resultados obtidos na análise de sensibilidade no capítulo Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de Fanger através do método estatístico de Monte Carlo. Resultados baseados no modelo de Fanger mostraram que uma variação em T_{ar} , MET e T_{rm} tem influência muito maior que aquelas provocadas por variações nos parâmetros V_{ar} e ϕ . Esse fato está de acordo com os gráficos obtidos nas análises do T_{rm} , MET e CLO, onde as curvas com a mesma faixa de T_{ar} se encontram próximas, mesmo com diferentes valores para V_{ar} e ϕ . Ressalta-se que V_{ar} foi o parâmetro que denotou a menor influência no PMV para os valores analisados, mas que este parâmetro está sujeito a grandes mudanças em seu valor, caso se atue diretamente nessa variável. Portanto, caso o sensoramento de V_{ar} seja custoso ou de difícil realização, e devido ao baixo peso desse parâmetro no modelo, pode-se elaborar um controle baseado no conforto térmico sem que seja considerado V_{ar} ou, ainda, esse controle pode ser especificamente sobre o PMV (que considera V_{ar}), adotando-se uma constante para esse parâmetro. Porém, caso esse parâmetro esteja sujeito a grandes mudanças,

principalmente pelo uso de um ventilador, o sensoramento dele pode ser fundamental, apesar da equação de Fanger ser pouco sensível a ele.

Com relação à análise das regiões de conforto, conclui-se que a consideração dos parâmetros individuais não somente é importante como é fundamental, porque a variação em apenas um dos fatores individuais, dentro de limites totalmente compatíveis com o contexto de um ambiente sujeito a um controle, desloca a região de conforto consideravelmente. Portanto, a estratégia de controle baseada em regiões de conforto que não considerem os fatores individuais, que são os casos largamente utilizados, está fadada a atuar sobre os sistemas de climatização de forma errada, provocando um desconforto nos ambientes que atuam, *i.e.*, ($|PMV| > 0,5$). Esse fato reforça a idéia que uma estratégia de controle baseada em PMV, tanto diretamente sobre o índice (uso de um sensor de PMV) quanto utilizando regiões de conforto obtidas considerando-se o PMV, tende a obter melhores resultados que as estratégias que consideram simplesmente temperatura e umidade ou em gráficos temperatura/umidade convencionais para a definição de região de conforto.

Para trabalhos futuros, recomenda-se uma extensão dessa análise para uma faixa maior de velocidade de ar.

Referências

- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Refrigerating and air conditioning engineers**. American Society of Heating. Atlanta, 1993.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Investigation of thermal comfort at high humidities**. Building Science: UC Berkeley. Disponível em: <<http://arch.ced.berkeley.edu/resources/bldgsci/research/thermalcomf.htm>>. Acesso em: 27 out. 2006.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Standard 55-1981**. Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, 1981.
- BIN, Y.; SEKHAR, S. C. Three-dimensional numerical simulation of a hybrid fresh air and recirculated air diffuser for decoupled ventilation strategy. **Building and Environment**, v. 42, n. 5, p. 1975-1982, 2006.
- DUARTE, M. V. **Ajuste de modelos dinâmicos de estruturas com não linearidades concentradas**. 1994, 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.
- FANGER, P.O. **Thermal comfort**. New York: McGraw-Hill, 1970.
- FREIRE, R.Z. **Técnicas avançadas de controle aplicadas a sistemas de climatização visando conforto térmico**. Curitiba, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - PPGEPS/CCET/PUCPR, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.
- FREIRE, R. Z.; OLIVEIRA, G. H. C.; MENDES, N. Thermal comfort based predictive controllers for building heating systems, In: IFAC WORLD CONGRESS, 16., 2005, Prague. **Proceedings...** Prague, Czech Republic: IFAC, 2005.
- GOUDA, M. M.; DANAHER, S.; UNDERWOOD, C. P. Thermal comfort based fuzzy logic controller. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 22, n. 4, p. 237-254, 2001.
- HAMDI, M.; LACHIVER, G. A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort. In: IEEE CONF. ON FUZZY SYSTEMS, 1., 1999, USA. **Proceedings...** USA: IEEE, 1999. p. 487-492.
- INNOVA AIR TECH INSTRUMENTS A/S (INNOVA). **Thermal comfort theory**. Copenhagen, 2005.
- KON, A. Thermal comfort sensor. In: IEEE INSTRUM. MEAS. TECH. CONF, 16., 1994, New York. **Proceedings...** New York: IEEE, 1994. p. 454-546.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP (Ref. 2460/05) e ao CNPq, do Ministério de Ciência e Tecnologia, pelo suporte financeiro.