

ESTRATÉGIAS PARA CONTROLE DE CONFORTO TÉRMICO BASEADAS EM ALGORITMOS PI E FUZZY

Emerson Donaisky

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)
Rua Imaculada Conceição, 1155 Curitiba - PR, 80.215-901 - Brasil
e-mail: alm_eber@yahoo.com.br

Bruno César Reginato

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)
e-mail: bruno.reginato@terra.com.br

Gustavo Henrique da Costa Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)
e-mail: gustavo.oliveira@pucpr.br

Nathan Mendes

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)
e-mail: nathan.mendes@pucpr.br

Resumo. Este artigo aborda o problema de controle de conforto térmico em edificações com sistemas de climatização HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning). Sendo que o índice de conforto térmico adotado foi o PMV (Predicted Mean Vote). Módulos para cálculo do PMV são incorporados a estratégias de controle convencionais a fim de melhorar o desempenho do sistema. Os módulos propostos são: i) realimentação do sinal de PMV, em substituição à realimentação da variável controlada do sistema, e ii) otimização do PMV em função do sinal de referência. Estes módulos são testados em algoritmos de controle PI e controle Fuzzy, com otimização de parâmetros via Nuvem de Partículas. Um estudo de caso para ambas as técnicas é apresentado para um modelo de edificação geometricamente similar ao benchmark BESTest, porém com materiais e dados climáticos da cidade de Curitiba.

Palavras chave: Conforto Térmico, PMV, Otimização, Controle PI, Controle Fuzzy

1. Introdução

A crescente mecanização e a industrialização da sociedade fazem com que uma parcela significativa da população passe grande parte da sua vida dentro de ambientes climatizados artificialmente (Fanger, 1970).

Sistemas de climatização têm como objetivo primário alterar as condições de determinado ambiente para prover condição de conforto térmico a seus ocupantes. No entanto, definir conforto térmico é uma tarefa um pouco subjetiva, que está além das condições de temperatura de determinado ambiente. Conforme a ISO 7730, define-se que conforto térmico é "o estado da mente que expressa satisfação com as condições climáticas do ambiente". Embora muitas pessoas possam concordar com esta definição, ela apresenta dificuldades para ser expressa em parâmetros físicos, como por exemplo, a temperatura e a umidade do ar.

Um índice para medir o conforto térmico é o PMV (*Predicted Mean Vote*), que consiste em um modelo sobre a opinião de cada pessoa a respeito de sua sensação térmica sobre o ambiente no qual ela está.

Neste contexto, o presente trabalho aborda o problema da busca de soluções para prover conforto térmico através de estratégias de controle de sistemas de climatização.

Diferentes estratégias de controle voltadas para conforto térmico foram propostas na literatura, por exemplo, (Kolokotsa *et al.*, 2001; Gouda *et al.*, 2001; Hamdi e Lachiver, 1998; Yonezawa *et al.*, ; Freire, 2006; Freire *et al.*, 2005).

Uma linha destes trabalhos aborda o problema de controle de conforto térmico em edificações utilizando algoritmos de controle preditivo (Freire *et al.*, 2005). Neste contexto, a equação de previsão da lei de controle

incorpora o cálculo do PMV, e é minimizada em um horizonte de tempo futuro. O resultado é uma lei de controle não linear que garante PMV ótimo a cada instante de amostragem.

O presente trabalho está voltado para a utilização de estratégias convencionais de controle, como algoritmos PI e baseado em lógica nebulosa (ou *fuzzy*). A motivação para tanto é, de um lado, facilitar a implementação da estratégia de controle em sistemas já instalados e, por outro lado, garantir a manutenção das condições de conforto térmico.

Assim sendo, propõe-se e analisa-se aqui a incorporação de dois módulos nos algoritmos de controle para garantia do conforto. O primeiro está relacionado com a substituição do sensor de temperatura por um sensor de PMV na malha de controle. O segundo está relacionado com o cálculo *on-line* do valor de temperatura que otimiza o PMV. Estes módulos são testados individualmente nos algoritmos de controle.

Este artigo está estruturado conforme apresentado a seguir. Na Seção 2, discute-se sobre conforto térmico, seus conceitos, definições e cálculo do índice PMV. Na Seção 3, descreve-se como o controlador PI e *Fuzzy* com realimentação de PMV foram desenvolvidos. Na Seção 4, apresenta-se o módulo para otimização do PMV via cálculo *on-line* do sinal de referência. Na Seção 5, um exemplo de aplicação dos conceitos desenvolvidos é apresentado e, finalmente, na Seção 6, o artigo é concluído.

2. Conforto Térmico e Cálculo do PMV

A primeira condição para que haja conforto térmico é que a pessoa não sinta calor e nem frio. Quando a temperatura corporal é inferior a 34°C ou superior a 37°C os sensores responsáveis pelas sensações térmicas passam a enviar impulsos ao cérebro. Tais impulsos dizem a ele o quão forte deve ser a reação para condicionar o corpo.

A relação entre parâmetros como temperatura epitelial, corporal e nível de suor são baseadas em experimentos feitos com pessoas termicamente confortáveis na ocasião. As relações entre os parâmetros podem ser notadas em gráficos onde observa-se que à medida que a transpiração aumenta, no mesmo ritmo, a temperatura corporal diminui.

Ao quantificar o clima de um ambiente interno é importante ressaltar que o homem não sente a temperatura do corpo, mas sim a energia desprendida ou absorvida pelo seu corpo. Portanto, os parâmetros que influenciam nisso são: temperatura radiante média, umidade, temperatura e velocidade do ar. No entanto, a influência destes parâmetros não é igual, tampouco é suficiente basear-se apenas em um deles.

Num ambiente onde muitas pessoas trabalham, utilizando roupas diferentes e desenvolvendo atividades diferentes, pode ser muito difícil encontrar uma solução de conforto térmico que sirva a todas, mas atividades isoladas podem ser feitas a fim de melhorar o conforto térmico localizado.

Num local onde muitas pessoas convivem juntas, pode-se saber o quão longe do conforto térmico está a média das sensações térmicas de cada pessoa. Para isso basta utilizar o PMV (*Predicted Mean Vote*), onde cada pessoa opina sobre sua sensação e a média do grupo é obtida. A escala varia de 3 (quente) à -3 (frio), onde 0 seria a sensação termicamente neutra. Embora esta última possa ser atingida pelo grupo, indivíduos em particular podem estar se sentindo desconfortáveis, uma vez que o conforto térmico varia levemente de pessoa para pessoa. Para medir o nível de desconforto destas pessoas utiliza-se o PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) para os que votaram -3, -2, +2 ou +3. A comparação entre o PMV e o PPD está mostrada na Tabela 1 (Innova AirTech Instruments, 1997).

Uma fórmula matemática que combina variáveis ambientais e parâmetros individuais pode ser proposta. Este índice (PMV) é baseado em um modelo teórico combinado com os resultados de experimentos de aproximadamente 1300 indivíduos (Fanger, 1970) e é dado pela Equação 1 (Freire, 2006).

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)\{(M - W) - 3,05 \times 10^{-3}[5733 - 6,99(M - W) - p_v]\} + \\ -0,42[(M - W) - 58,15] - [1,7 \times 10^{-5}M(5867 - p_v)] - [0,0014M(34 - t_{bs})] + \\ -\{3,69 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4]\} - [f_{cl}h_c(t_{cl} - t_{bs})] \quad (1)$$

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

$$p_v = \phi \times P_{SAT}(t_{bs}) \quad (3)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,032M - 0,18I_{cl}(3,4f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm})^4) + f_{cl}h_c(t_{cl} - t_{bs})) \quad (4)$$

Sendo:

PMV = voto médio estimado [-]

M = energia metabólica [W/m^2]

W = trabalho externo [W/m^2]

p_v = pressão parcial de vapor d'água [kPa]

t_{bs} = temperatura de bulbo seco [$^{\circ}\text{C}$]

f_{cl} = relação entre as áreas superficiais do corpo vestido e do corpo nu [-]
 t_{cl} = temperatura da superfície das vestes [$^{\circ}C$]
 I_{cl} = índice de vestimenta [m^2C/W]
 t_{rm} = temperatura radiante média [$^{\circ}C$]
 h_c = coeficiente de convecção [W/m^2K]
 v = velocidade do ar [m/s]
 ϕ = umidade relativa [-]
 P_{SAT} = pressão de saturação de vapor d'água [kPa]

Conseqüentemente, combinando-se as Equações 1, 2, 3 e 4, o índice *PMV* pode ser reescrito como função de quatro variáveis ambientais e dois parâmetros individuais, como mostrado na Equação 5.

$$PMV = G(t_{bs}, \phi, t_{rm}, v, M, I_{cl}) \quad (5)$$

Tabela 1: Relação entre PMV e PPD

PMV	Sensação Térmica	PPD(%)
+3	Muito Quente	100
+2	Quente	75
+1	Levemente Quente	25
0	Neutralidade	5
-1	Levemente Frio	25
-2	Frio	75
-3	Muito Frio	100

3. Algoritmos de controle com realimentação de PMV

Seja um sistema de controle em tempo discreto onde o sinal de controle enviado ao processo é calculado em função do erro e da variação do erro da variável controlada, isto é:

$$\begin{cases} \Delta u(k) &= \mathcal{F}(e(k), \Delta e(k)) \\ u(k) &= u(k-1) + \Delta u(k) \end{cases} \quad (6)$$

onde $e(k)$ é o sinal de erro dado por $e(k) = w(k) - y(k)$, $y(k)$ é a variável controlada do processo, $w(k)$ é o sinal de referência e $u(k)$ é o sinal de controle do processo. Δ é um operador tal que $\Delta x(k) = x(k) - x(k-1)$. Nesta estrutura de controle, o sinal $\Delta u(k)$ é utilizado para incorporar um termo integral no ramo direto da malha de controle e eliminar, desta forma, erros em regime permanente para perturbações constantes. O termo $\Delta e(k)$ incorpora a tendência do sinal de erro na lei de controle.

Diversos controladores em tempo discreto possuem a estrutura descrita pela Equação 6. Um exemplo clássico é o controlador PI digital dado por (Astrom e Hagglund, 1995):

$$\begin{cases} \Delta u(k) &= c_0 e(k) + c_1 \Delta e(k) \\ u(k) &= u(k-1) + \Delta u(k) \end{cases} \quad (7)$$

onde, c_0 e c_1 são calculados em função dos ganhos proporcional K_p e integral K_i do PI contínuo. No caso de aproximação trapezoidal (ou Tustim), para controle em tempo discreto, estes parâmetros são dados por $c_0 = K_i \Delta t$ e $c_1 = K_p - K_i \Delta t / 2$, onde Δt é o período de amostragem.

Uma classe de sistemas de controle *Fuzzy* assume que a lei de controle está estruturada em regras do tipo **SE condição ENTÃO ação** (algoritmo de controle baseado em regras) (Lee, 1990; Pedrycz e Gomide, 1998). A base de regras é construída a partir da experiência do operador sobre o funcionamento e as características do processo sob controle.

Utilizando a estrutura estabelecida pela Equação 6, obtém-se um controlador *Fuzzy* cujo modo de operação é análogo ao controlador PI (Tang e Mulholland, 1987). Nesta estrutura, os sinais $e(k)$, $\Delta e(k)$ e $\Delta u(k)$ são transformados em variáveis lingüísticas *Fuzzy* (operação de *fuzzificação*) que são definidas em um universo de

discurso, usualmente normalizado em $[-1, 1]$. Para estabelecer a semântica das regras, são definidos 3 (três) conjuntos *Fuzzy*, a saber: *Grande (G)*, *Médio (M)* e *Pequeno (P)*.

A base de regras do controlador é resumida na Tabela 2. Nesta Tabela, cada elemento é interpretado como uma regra, conforme exemplificado pelo elemento (3,1) da tabela:

Tabela 2: Regras do sistema de controle *Fuzzy*.

	$e(k)$	\rightarrow		
$\Delta e(k)$		<i>P</i>	<i>M</i>	<i>G</i>
\downarrow	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>M</i>
	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>M</i>	<i>G</i>
	<i>G</i>	<i>M</i>	<i>G</i>	<i>G</i>

SE $e(k)$ é *Pequeno* **E** $\Delta e(k)$ é *Grande* **ENTÃO** $\Delta u(k)$ é *Médio*

Um mecanismo de inferência atua sobre as regras para cálculo do sinal de controle apropriado quando determinado estado do processo é detectado. Este mecanismo de inferência é descrito em (Lee, 1990; Pedrycz e Gomide, 1998).

Quando os universos de discurso são normalizados, é necessária uma ponderação para adequá-los aos valores reais dos sinais de entrada e saída. Assim, o sistema de controle é dado pela Equação 8.

$$\begin{cases} \Delta u(k) &= \mathcal{F}(k_e e(k), k_{\Delta e} \Delta e(k)) \\ u(k) &= u(k-1) + k_u \Delta u(k) \end{cases} \quad (8)$$

onde as ponderações k_u , k_e e $k_{\Delta e}$ são utilizadas como parâmetros de projeto para sintonia do controlador. Além destes parâmetros, a dinâmica do controlador *Fuzzy* é função do método de inferência (neste trabalho, utilizam-se operadores *min-max*), pelo método de *defuzzificação* (neste trabalho, utiliza-se o método do centro de gravidade) etc., e, principalmente, pela própria estrutura da base de regras que deve refletir as características de controle do processo.

Seja um ambiente onde sensores de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar estão presentes, assumindo-se também que a temperatura radiante média é igual à temperatura ambiente e que as condições pessoais podem ser estimadas (índice metabólico e índice de vestimenta) e fornecidas pelo usuário (ver detalhes em Trebien *et al.*, 2006), a cada instante de amostragem, um valor do PMV pode ser calculado conforme a Equação 9.

$$y_{PMV}(k) = G(y_{temp}(k), y_{umid}(k), y_{temp}(k), y_{vel.ar}(t), M, I_{cl}) \quad (9)$$

Assim sendo, propõe-se neste trabalho, para ambos os controladores, utilizar, como sinal de erro a diferença entre o PMV desejado (isto é, $PMV=0$) e o PMV mensurado. Este sinal de erro é, portanto, enviado ao controlador, que atuará no sistema térmico para promover o conforto térmico. A Figura 1 apresenta o digrama de blocos deste sistema de controle.

Como o PMV pode variar entre $[-3, 3]$, então o universo de discurso do controlador *Fuzzy* foi definido como sendo a máxima variação possível para o sinal da variável em questão, portanto, 3 para o ganho k_e (referente ao erro), 6 para o ganho $k_{\Delta e}$ (relativo à variação do erro) e 5 para o ganho k_u (referente à saída).

4. Otimização do PMV via sinal de referência

Usualmente, o sinal de referência de um sistema de controle reflete o valor desejado para a variável controlada. No caso do controle de sistemas de climatização, tem-se um valor desejado para o sinal de temperatura e/ou umidade relativa.

Seja um ambiente com um sistema de controle de temperatura implementado e onde sensores de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar estão presentes. Assume-se também que a temperatura radiante média é igual à temperatura ambiente (Trebien *et al.*, 2006) e que as condições pessoais podem ser estimadas (índice metabólico e índice de vestimenta) e fornecidas pelo usuário. Portanto, a cada instante de amostragem, um valor do PMV pode ser calculado conforme a Equação (9).

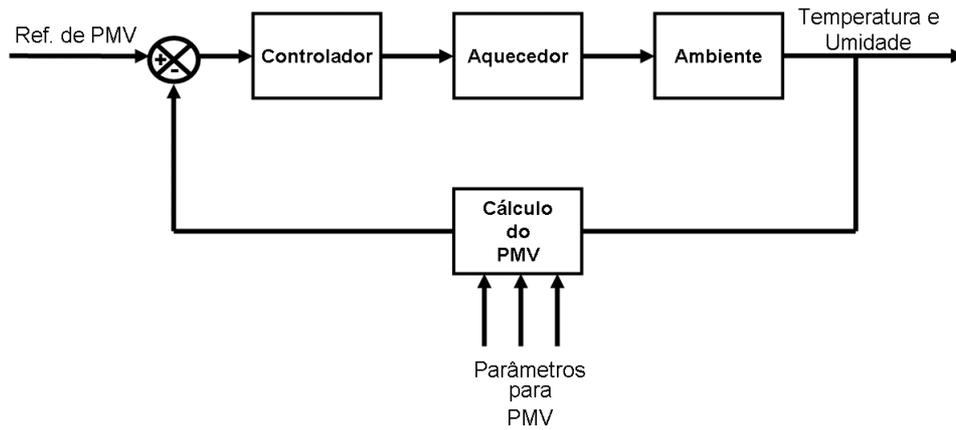


Figura 1: Realimentação de PMV.

Entretanto, para determinada condição ambiental e pessoal, existe um sinal de temperatura ambiente para o qual o PMV é nulo. Este valor ótimo pode ser obtido através da utilização *on-line* de um método de otimização irrestrita com uma variável e é utilizado como sinal de referência para o controlador de temperatura, isto é:

$$\min_{w_{temp}(k)} G^2(w_{temp}(k), y_{umid}(k), w_{temp}(k), y_{vel.ar}(k), M, I_{cl}) \quad (10)$$

O valor do sinal de referência, no instante de amostragem k , é o argumento mínimo do problema de otimização (Equação 10). Este sistema descrito está representado na Figura 2.

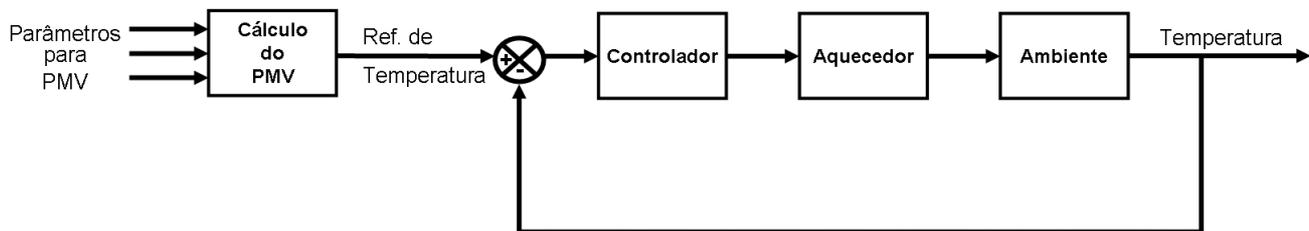


Figura 2: Realimentação de Temperatura e otimização do PMV.

5. Exemplo de simulação

Nesta seção analisa-se o desempenho dos sistemas de controle baseados em conforto térmico propostos nas seções anteriores. Para tanto, descreve-se o problema de aquecimento de um ambiente a fim de manter as condições ambientais em um nível que promova a melhor sensação de conforto térmico possível para os ocupantes. Desta forma, as propriedades do ambiente e os modelos para temperatura e umidade relativa internas são descritos nas próximas sub-seções.

5.1. Definição do ambiente de simulação

O ambiente de simulação utilizado possui as dimensões físicas do caso *benchmark BESTest* (IEA, 2003), porém com materiais tipicamente empregados nas edificações nacionais.

As dimensões do ambiente são apresentadas na Figura 3. As paredes da edificação possuem três camadas: reboco (0,02m de largura), tijolo (0,10m) e reboco (0,02m). As propriedades básicas dos materiais estão representadas na Tabela 3. Os coeficientes de transferência de calor por convecção internos e externos são fixados em $5W/m^2K$. Assume-se a absorvidade das paredes igual a 0,35. A potência máxima do aquecedor está limitada em $5000W$ e considera-se uma taxa de ventilação de 0,29 trocas de ar por hora.

Este modelo pode ser implementado em um simulador de edificações como, por exemplo, o PowerDomus (Mendes *et al.*, 2001). Através deste ambiente de simulação, dados climáticos reais e um período de amostragem, pode-se realizar um processo de identificação de sistemas e as equações a diferenças finitas em

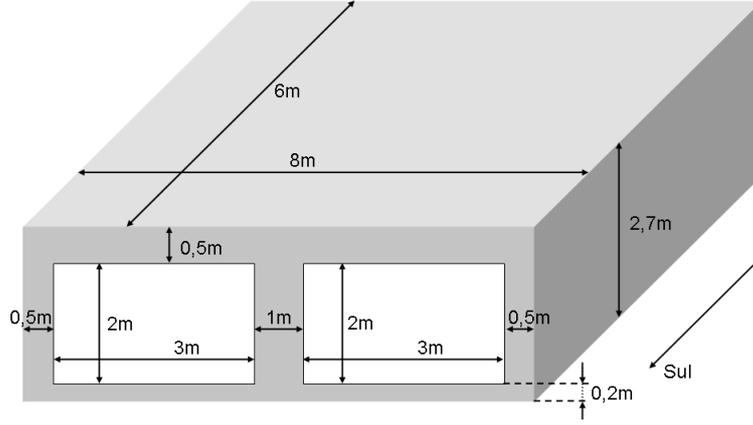


Figura 3: Dimensões do ambiente utilizado nas simulações.

Tabela 3: Propriedades termofísicas dos materiais que compõem as paredes da edificação.

Material	Densidade (kg/m^3)	Condutividade Térmica ($W/(m \times K)$)	Calor Específico ($J/(kg \times K)$)
Tijolo	1900	1,11	920
Reboco	2050	1,96	950

tempo discreto obtidas para temperatura e umidade estão mostradas nas Equações 11 e 12, respectivamente. Tais equações foram obtidas por Freire, 2006, através de técnicas de identificação por modelo ARMAX (Ljung, 1999), utilizando-se dados TRY (*Test Reference Year*) para a cidade de Curitiba - PR.

Este ambiente, assim como o modelo obtido, está descrito com mais detalhes em (Freire, 2006).

$$(1 - 0,9700q^{-1})y_{temp}(k) = (0,0840q^{-1})U(k) + (0,0253q^{-1})T_{EXT}(k) + (0,2034q^{-1})H_{EXT}(k) + (-0,0724q^{-1})S_{EXT}(k) + (1 + 0,6767q^{-1})\xi(k) \quad (11)$$

$$(1 - 0,9692q^{-1})y_{umid}(k) = (-0,0021q^{-1})U(k) + (0,0003q^{-1})T_{EXT}(k) + (0,0176q^{-1})H_{EXT}(k) + (0,0033q^{-1})S_{EXT}(k) + (1 + 0,7239q^{-1})\xi(k) \quad (12)$$

onde $y_{temp}(k)$ é a temperatura interna [$^{\circ}C$], $y_{umid}(k)$ é a umidade relativa interna [-], $U(k)$ é o sinal de entrada do atuador [kW], $T_{EXT}(k)$ é a temperatura externa [$^{\circ}C$], $H_{EXT}(k)$ é a umidade relativa externa [-], $S_{EXT}(k)$ é a radiação solar total [W/m^2] e $\xi(k)$ representa o sinal de perturbação.

Para representar o ambiente em questão, foram utilizados dados climáticos para a cidade de Curitiba durante o intervalo de uma semana. Estes dados são apresentados na Figura 4.

5.2. Caso 1: Algoritmos de controle com realimentação de PMV

A primeira situação analisada é a dos controladores com realimentação de PMV, apresentados na Seção 3. Para tanto, são utilizados os algoritmos de controle PI e *Fuzzy*.

A Equação 5 e/ou bloco denominado "Cálculo do PMV" da Figura 1 possui os seguintes parâmetros: os sinais de temperatura e umidade relativa são medidos através de sensores dispostos no ambiente, o sinal de temperatura radiante média é feito igual ao sinal de temperatura, a velocidade do ar é definida igual a $v = 0,1 m/s$ e os fatores individuais de atividade e vestimenta são adotados como sendo $M = 69,78 W/m^2$ ($M = 1,2 Met$) e $I_{cl} = 0,1023 m^2C/W$ ($I_{cl} = 0,66 Clo$), representando um ambiente de escritório.

No caso do controlador PI, é necessária a seleção dos ganhos K_p e K_i . Neste sentido, para encontrar os melhores parâmetros utilizou-se a técnica de Otimização por Nuvem de Partículas (ONP) (Kennedy e Eberhardt, 1995; Donaisky, 2005). Esta estratégia de otimização está baseada na minimização do critério MSE (Erro Médio Quadrático) entre a curva de saída (sinal de realimentação PMV) e o sinal de referência (igual a 0).

A ONP é baseada em simulação simplificada do comportamento social de animais, como revoada de pássaros e cardume de peixes em busca de alimentos ou mesmo, fugindo de predadores. Assim os indivíduos da ONP procuram por uma melhor solução do problema através de um intercâmbio de informações sobre o espaço de busca de melhores soluções (Donaisky, 2005).

Após a otimização obtiveram-se os parâmetros K_p e K_i iguais a 101,713 e 0,844, respectivamente.

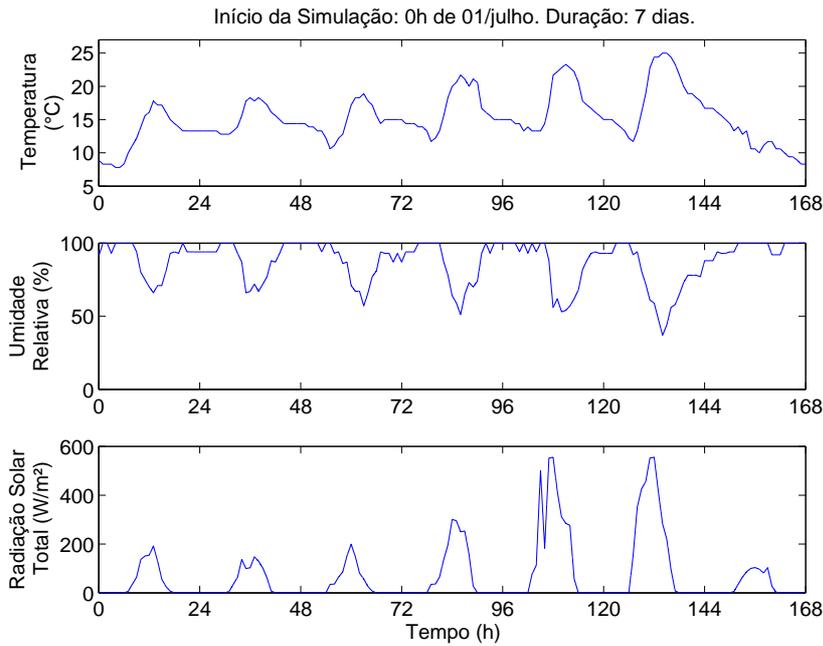


Figura 4: Temperatura externa, umidade relativa e radiação solar total para o período de simulação em Curitiba-Brasil

A simulação é feita para um intervalo de tempo de 7 dias e o controlador é ligado à zero hora do terceiro dia, isto é, às 48 horas. O desempenho do sistema de controle com PI é apresentado nas Figuras 8 e 9. O MSE do PMV é igual a 0,83881.

Analisando as Figuras 8, 10 e 13, percebe-se que, em aproximadamente, no instante de tempo igual a 136 horas, há um leve aumento (em torno de 0,05) do PMV. No entanto, justifica-se este comportamento devido ao aumento da temperatura externa, o que provocou ligeiro aquecimento no ambiente, e, como o equipamento de climatização utilizado é um aquecedor, não há como fazer o PMV manter-se em zero, pois necessitaria, naquele instante, de um aparelho condicionador de ar para resfriar o ambiente.

O controlador *Fuzzy* também foi aplicado com a mesma estratégia, ou seja, com realimentação de PMV tendo como ponto de partida o desenvolvimento apresentado na Seção 3 e a base de regras mostrada na Tabela 2.

O passo seguinte para a sintonia do controlador *Fuzzy* foi o ajuste das funções de pertinência. Para tanto, foi utilizado o algoritmo ONP para achar as funções de pertinência relacionadas aos sinais de entrada e saída, tendo como base que estas seriam triangulares e simétricas. O critério de minimização da ONP é o MSE do sinal de PMV (comparando-o com a referência zero). As funções ótimas calculadas estão mostradas, respectivamente, nas Figuras 5, 6 e 7.

O desempenho em malha fechada do algoritmo de controle *Fuzzy*, com realimentação de PMV, assim sintonizado e aplicado ao modelo de edificação da Seção 5.1, é apresentado nas Figuras 10 e 11. O MSE do sinal de PMV é 0,83884.

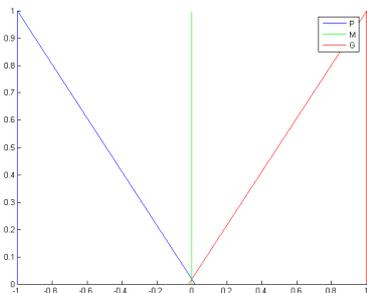


Figura 5: Funções de Pertinência do Erro

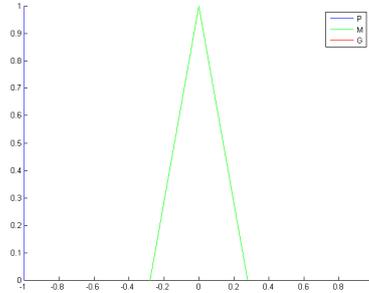


Figura 6: Funções de Pertinência da Variação do Erro

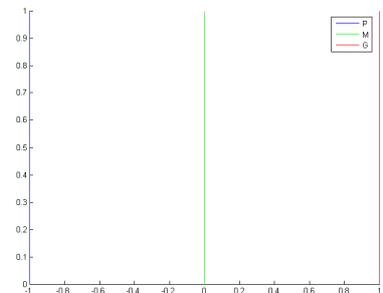


Figura 7: Funções de Pertinência da Saída

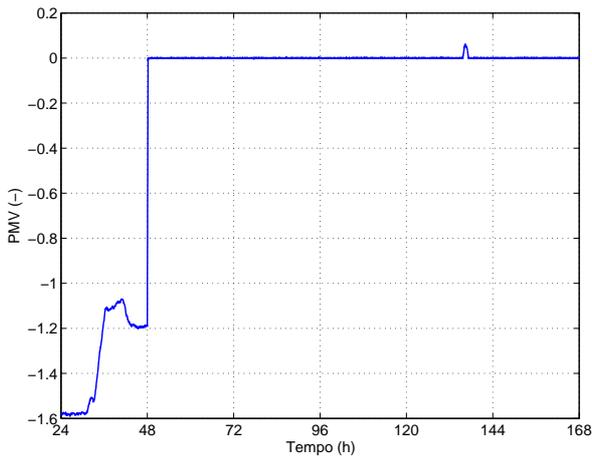


Figura 8: PMV para o Controlador PI com realimentação de PMV

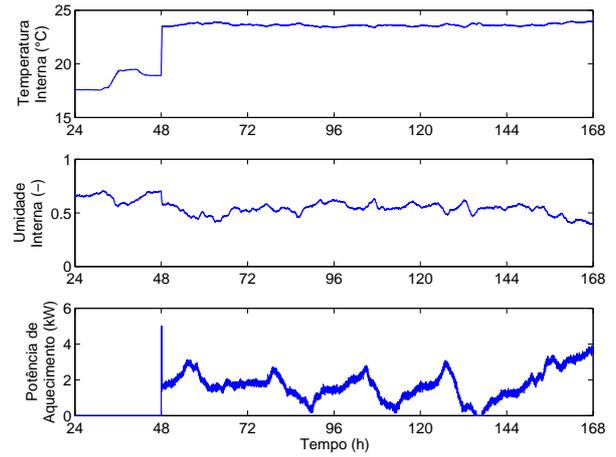


Figura 9: Temperatura interna, umidade relativa e sinal de controle para o Controlador PI com realimentação de PMV

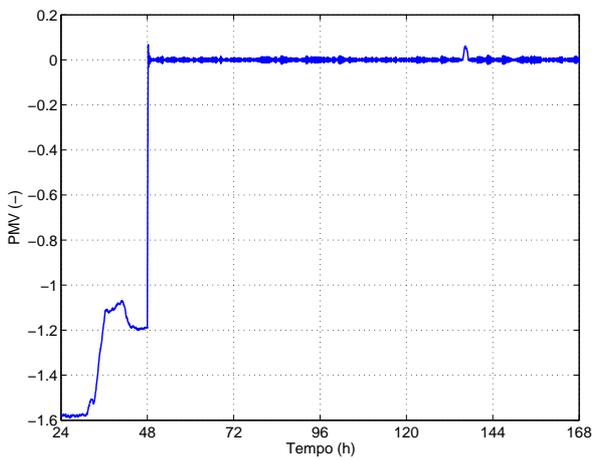


Figura 10: PMV para o Controlador *Fuzzy* com realimentação de PMV

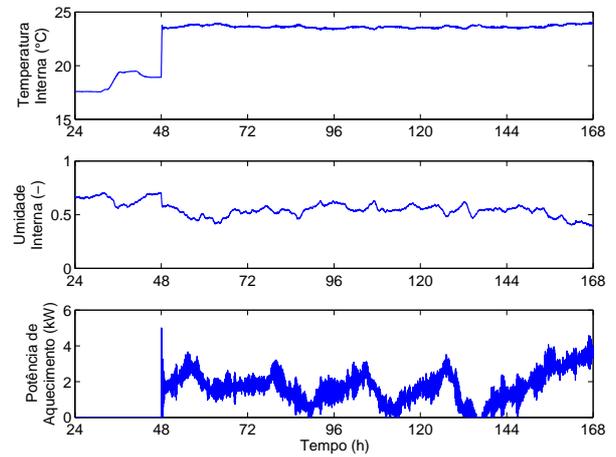


Figura 11: Temperatura interna, umidade relativa e sinal de controle para o Controlador *Fuzzy* com realimentação de PMV

5.3. Caso 2: Otimização do PMV via sinal de referência

A segunda situação analisada é o caso onde o sinal de referência do controlador é obtido através de um critério de otimização que busca minimizar o PMV, conforme apresentado na Seção 4. Para tanto, é utilizado o algoritmo de controle PI.

Esta estratégia de controle diferencia-se da anterior, pois, com base nos parâmetros de entrada atuais do bloco "cálculo do PMV", calcula-se a temperatura para o ambiente de forma a atingir (ou manter) o PMV em zero, portanto o *set-point* de temperatura varia conforme o tempo. Isto é visivelmente notado na Figura 12. Nesta figura, prezou-se por mostrar com detalhes a variação de temperatura quando o controlador é ligado, pois, antes do instante 48 horas, como o controlador está desligado, o *set-point* desta variável é zero.

A Equação 5 e/ou bloco denominado "cálculo do PMV" da Figura 2 possui os seguintes parâmetros: os sinais de temperatura, umidade relativa são medidos através de sensores dispostos no ambiente, o sinal de temperatura radiante média é feito igual ao sinal de temperatura, a velocidade do ar é definida igual a $v = 0,1 \text{ m/s}$ e os fatores pessoais de atividade e vestimenta são escolhidos como sendo $M = 69,78 \text{ W/m}^2$ ($M = 1,2 \text{ Met}$) e $I_{cl} = 0,1023 \text{ m}^2\text{C/W}$ ($I_{cl} = 0,66 \text{ Clo}$), representando um ambiente de escritório.

Para selecionar os ganhos K_p e K_i , também utilizou-se a técnica ONP para encontrar os melhores parâmetros, ou seja, os parâmetros que minimizam o MSE. Portanto, obtiveram-se os parâmetros K_p e K_i iguais a 27,241 e

0,227, respectivamente.

A simulação também foi feita para um intervalo de tempo de 7 dias, ligando o controlador apenas à zero hora do terceiro dia. O desempenho deste sistema de controle com PI é apresentado nas Figuras 13 e 14. O MSE do PMV é igual a 0,83881. Observa-se que o MSE obtido é muito próximo aos anteriores, sendo que, numericamente, a discrepância entre esses valores, no pior dos casos, passa a acontecer a partir da 5ª casa decimal.

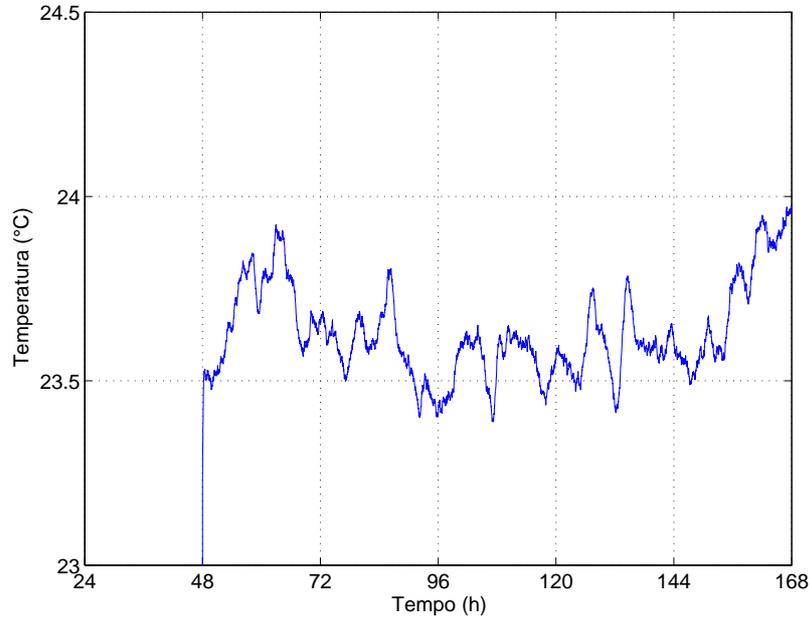


Figura 12: Variação do *set-point* de Temperatura para manter o PMV nulo

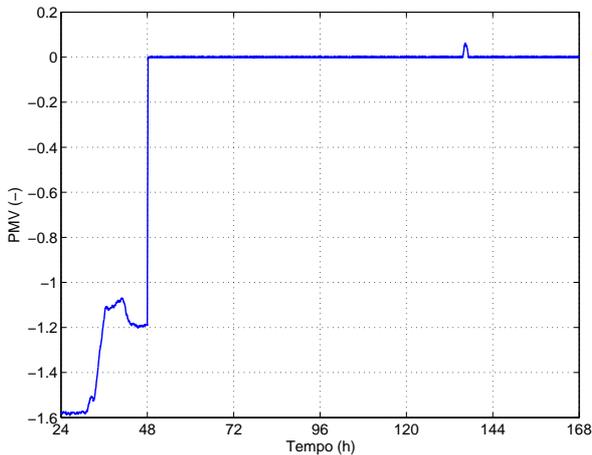


Figura 13: PMV para o Controlador PI com realimentação de Temperatura

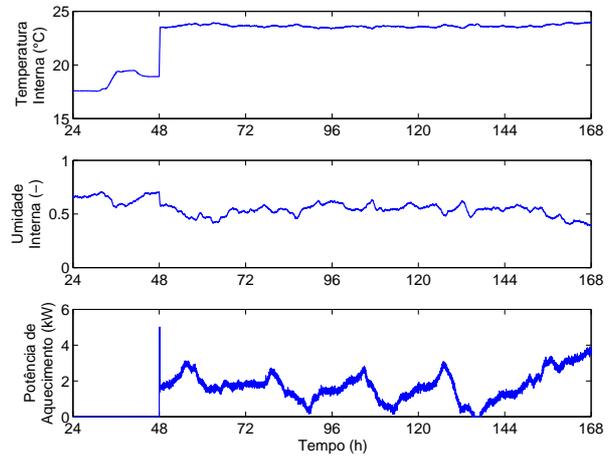


Figura 14: Temperatura interna, umidade relativa e sinal de controle para o Controlador PI com realimentação de Temperatura

6. Conclusão

Conforme apresentado neste artigo, foram desenvolvidas duas estratégias diferentes para solucionar o problema de conforto térmico. A primeira estratégia foi aplicada utilizando os algoritmos de controle PI e *Fuzzy*, já a segunda, utilizou somente algoritmo PI.

Para a primeira estratégia, adotou-se que o PMV do ambiente foi mensurado a partir de um sensor de PMV, portanto o *set-point* do sistema foi em PMV e toda a lei de controle subsequente foi desenvolvida a partir deste princípio. Sendo a referência do sistema em PMV, esta referência foi sempre zero, pois desejou-se um ambiente termicamente confortável.

A segunda estratégia utilizou a referência (*set-point*) do sistema de controle para ajustar a temperatura do ambiente de modo que o PMV fosse zero. Ou seja, a cada instante de amostragem, com base nos parâmetros físicos (tais como umidade, velocidade e temperatura do ar) e pessoais, calculou-se um valor de temperatura que levaria ao PMV nulo. Portanto a referência do sistema de controle foi variante no tempo, sendo função do valor ótimo de temperatura previamente calculado.

Independente do algoritmo de controle para as estratégias apresentadas, todos cumpriram sua função conforme estipulado previamente: manter o PMV o mais próximo de zero possível. Sendo que houve uma leve variação numérica de desempenho para cada um deles. Apesar de terem seus parâmetros otimizados (via ONP), tais controladores ainda poderiam apresentar um desempenho melhor se, por exemplo, para o controlador *Fuzzy*, a base de regras fosse melhorada, se mais funções de pertinência fossem adicionadas ao projeto ou se os ganhos relativos à normalização das entradas e saída fossem otimizados.

7. Agradecimentos

Este trabalho tem apoio FINEP, convênio 01.05.1064.00, referência 2460/05.

8. Referências

- Astrom, K. J. e Hagglund, T., 1995, “PID Controllers: Theory, Design and Tuning”, ISA Press, 2 edition.
- Donaisky, E., 2005, Otimização de Trajetória em Robótica Móvel Baseada em Algoritmo de Nuvem de Partículas, Technical report, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.
- Fanger, P. O., 1970, “Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering”, McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- Freire, R. Z., Oliveira, G. H. C., e Mendes, N., 2005, Thermal Comfort Based Predictive Controllers for Building Heating Systems, “Proc. of the 16th IFAC World Congress (IFAC’05)”, Prague, Czech Republic.
- Freire, R. Z., 2006, Técnicas Avançadas de Controle Aplicadas a Sistemas de Climatização Visando Conforto Térmico, Master’s thesis, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
- Gouda, M. M., Danaher, S., e Underwood, C. P., 2001, Thermal Comfort Based Fuzzy Logic Controller, “Building Serv. Eng. Res. Technol.”, Vol. 22, No. 4, pp. 237–253.
- Hamdi, M. e Lachiver, G., 1998, A Fuzzy Control System Based on the Human Sensation of Thermal Comfort, “Proc. of IEEE International Conference on Fuzzy Systems”, pp. 487–492, United States.
- IEA, 2003, International Energy Agency - Annex 43 - Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools, Technical report, Golden, Colorado, USA.
- Innova AirTech Instruments, 1997, Thermal Comfort, Technical report.
- Kennedy, J. F. e Eberhardt, R. C., 1995, Particle Swarm Optimization, “Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks”, pp. 1942–1948.
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G. S., Lalaitzakis, K., e Antonidakis, E., 2001, Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction, “Energy and buildings”, Vol. 33, pp. 531–543.
- Lee, C. C., 1990, Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I e II, “IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics”, Vol. 20, No. 2, pp. 404–418.
- Ljung, L., 1999, “System Identification: Theory for the user”, Prentice Hall, Inc., 2 edition.
- Mendes, N., Oliveira, G. H. C., e Araújo, H. X., 2001, Building Thermal Performance Analysis by Using Matlab/simulink, “Proc. of the Building Simulation Conference (IBPSA’01)”, Vol. 1, pp. 473–480, Rio de Janeiro, Brasil.
- Pedrycz, W. e Gomide, F., 1998, “An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design”, MIT Press.

- Tang, K. L. e Mulholland, R. J., 1987, Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller Designs, “IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics”, Vol. 17, No. 6, pp. 1085–1087.
- Trebien, R., Mendes, N., e Oliveira, G. H. C., 2006, Análise do Modelo de Fanger (PMV) para Desenvolvimento de Sistemas de Controle, “Proc. of 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT’05)”, Curitiba, Brasil - (Aceito para publicação).
- Yonezawa, K., Yamada, F., Wada, Y., e Hanada, Y., Comfort Air-Conditioning Control for Building Energy-Saving, “26th IEEE Industrial Electronics Society Conference”, Vol. 3, pp. 1737–1742.

STRATEGIES FOR THERMAL COMFORT CONTROL BASED ON PI AND FUZZY ALGORITHMS

Emerson Donaisky Industrial and System Engineering Graduate Program (PPGEPS)
Pontifical Catholic University of Paraná (PUCPR)
Rua Imaculada Conceição, 1155 Curitiba - PR, 80.215-901 - Brazil
e-mail: alm_eber@yahoo.com.br

Bruno César Reginato Industrial and System Engineering Graduate Program (PPGEPS)
Pontifical Catholic University of Paraná (PUCPR)
e-mail: bruno.reginato@terra.com.br

Gustavo Henrique da Costa Oliveira Industrial and System Engineering Graduate Program (PPGEPS)
Pontifical Catholic University of Paraná (PUCPR)
e-mail: gustavo.oliveira@pucpr.br

Nathan Mendes Mechanical Engineering Graduate Program (PPGEM)
Pontifical Catholic University of Paraná (PUCPR)
e-mail: nathan.mendes@pucpr.br

Abstract. *This article discusses the thermal comfort problem in buildings equipped with HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems. The Fanger’s PMV index has been chosen and a PMV-based methodology has been implemented in order to improve the performance of a heating system. The proposed strategies are: i) PMV feedback in order to replace the controlled variable feedback and ii) PMV-based-set-point optimization. These techniques have been implemented using both PI and Fuzzy control algorithms, optimizing the variables using the Particle Swarm Optimization algorithm. Simulation results for both techniques are presented for building model geometrically-like-BESTest, but with Brazilian material and the weather data file for the city of Curitiba.*

Keywords. *Thermal Comfort, PMV, Optimization, PI Control, Fuzzy Control*