

## CONTROLE PREDITIVO APLICADO A SISTEMAS DE AQUECIMENTO PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA E MELHORAMENTO DE ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO

### Roberto Zanetti Freire

Pontifícia Universidade Católica do Paraná.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS) - CCET / PUCPR.  
Rua Imaculada Conceição, 1155 Curitiba - PR, 80.215-901 - Brasil  
roberto.freire@pucpr.br

### Gustavo Henrique da Costa Oliveira

Pontifícia Universidade Católica do Paraná.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS) - CCET / PUCPR.  
Rua Imaculada Conceição, 1155 Curitiba - PR, 80.215-901 - Brasil  
gustavo.oliveira@pucpr.br

### Nathan Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná.  
Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) - CCET / PUCPR.  
Rua Imaculada Conceição, 1155 Curitiba - PR, 80.215-901 - Brasil  
nathan.mendes@pucpr.br

**Resumo.** A climatização de ambientes é freqüentemente realizada através do controle de temperatura. Em alguns casos, baseado em critérios de conforto térmico, adicionam-se equipamentos de umidificação/desumidificação para prover o controle simultâneo de temperatura e umidade relativa de recintos. Neste trabalho, propõe-se a utilização de técnicas de controle preditivo para otimização das condições psicrométricas visando conforto térmico e/ou redução de consumo de energia em sistemas com apenas um atuador associado ao sistema de aquecimento. Resultados de simulação baseados em dados climáticos do tipo TRY (Test Reference Year) para a cidade de Curitiba são apresentados, validando a metodologia proposta em termos de controle de temperatura, umidade relativa e de consumo de energia.

**Palavras chave:** climatização de ambientes, conforto térmico, controle preditivo, eficiência energética.

### 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, 1974). Segundo (Clarke, 2001), cerca de oitenta por cento do tempo das pessoas é gasto no interior das edificações.

Este fato cria um interesse crescente no estudo da física térmica de edificações e metodologias de climatização de ambientes baseadas em equipamentos de HVAC (*Heating Ventilation and Air Conditioning*) que proporcionem condições térmicas e qualidade do ar aceitáveis para o ser humano. Com a tecnologia presente nos dias atuais, é possível obter quaisquer condições climáticas em um ambiente fechado. Por outro lado, é grande o consumo de energia referente a sistemas HVAC dentro de uma edificação. Percebe-se assim que um compromisso entre conforto térmico em ambientes climatizados, custo baixo de energia e nível tecnológico embarcado economicamente viável ainda é um desafio.

Neste contexto, o presente trabalho aborda o problema da busca de soluções para prover conforto térmico através da proposta de soluções avançadas de controle de processos. Sob este ponto de vista, os sistemas HVAC são compostos de vários sub-sistemas (muitos deles não-lineares) que, atuando conjuntamente, possuem ordem elevada e apresentam um comportamento tipicamente super-amortecido, com constantes de tempo elevadas. Existem também restrições em relação à amplitude e à variação do sinal de controle, isto é, os limites relacionados com a potência disponível para climatizar o ambiente. Todas estas características citadas, juntamente com a necessidade de controle das condições de conforto térmico, isto é, controle multivariável, da redução de energia consumida e da influência dos equipamentos na rede elétrica (qualidade de energia), justificam a utilização de técnicas avançadas de controle.

Diversas soluções para projeto de sistemas de controle de sistemas térmicos já foram propostas na literatura. Estudos relatam desde soluções baseadas em controle PID com ajuste automático das variáveis de controle visando melhor performance do equipamento (Wang et al., 1999) até controladores com lógica *fuzzy*, por exemplo em (Oliveira et al., 2001), do tipo adaptativo (Chen and Lee, 1990) (Astrom et al., 1993), entre outros.

Todos estes casos tratam o caso de controle de temperatura e, em alguns deles, e.g. (Oliveira et al., 2001), problema do conforto térmico é abordado através da definição de faixas para o sinal de referência de temperatura. Outros trabalhos abordam o problema de controle de conforto térmico diferentemente. Em (Dumur and Boucher, 1994), desenvolve-se uma estratégia para antecipar mudanças futuras no sinal de referência e assim permanecer mais tempo próximo do valor desejado. Esta estratégia, testada inicialmente em PIDs, é então apresentada para o algoritmo GPC. Em (Kolokotsa et al., 2001), descreve-se especificações para algoritmos de controle *fuzzy* clássicos para incorporar preferências do usuário na obtenção de conforto. Já em (Hamdi and Lachiver, 1998), um sistema especialista determina valores para os sinais de referência de temperatura e velocidade do ar baseado na medição do PMV.

O presente trabalho está baseado na utilização de controle do tipo preditivo (Clarke, 1994) (Camacho and Bordns, 1995) em ambientes climatizados. Assume-se aqui também uma zona térmica climatizada artificialmente através de sistemas de aquecimento. Este tipo de técnica de controle preditivo apresenta conceitos bastante intuitivos, o que facilita o ajuste dos parâmetros do controlador tanto em processos industriais quanto residenciais, com fácil tratamento e manipulação de restrições para entradas e saídas do sistema.

Neste contexto, descreve-se aqui uma técnica clássica de controle preditivo e propõe-se duas soluções adicionais que possuem como objetivo: *i*) utilização racional de energia, isto é, minimização do custo de energia mantendo padrões mínimos de conforto, *ii*) otimização da relação temperatura / umidade dentro das limitações de atuadores disponíveis visando melhorar o conforto térmico do ambiente.

O presente artigo está dividido conforme apresentado a seguir. Na próxima seção, discute-se a questão de análise e controle de conforto térmico, enquanto que, na Seção 3, descreve-se a estratégia de controle proposta. Na Seção 4, apresentam-se os resultados obtidos com os exemplos de simulação, seguidos pela Seção 5, onde o artigo é concluído.

## 2. O problema de controle de conforto térmico

Engenheiros, Arquitetos e ocupantes consideram que a umidade relativa de ambientes é pouco importante para um projeto de sucesso porque a temperatura é mais fácil de ser sentida, quantificada e compreendida. No entanto, pesquisas têm mostrado que a umidade relativa de interiores é importante e afeta significativamente: *i*) conforto térmico e respiratório; *ii*) saúde de ocupantes; *iii*) percepção da qualidade do ar interior (IAQ - *Indoor Air Quality*); *iv*) durabilidade dos materiais e *v*) consumo de energia.

Sabe-se que um dos principais mecanismos de regulação de temperatura do corpo humano é a evapotranspiração que ocorre através dos poros da pele retirando calor latente de forma proporcional à diferença de concentração entre o vapor em contato com a pele e o vapor presente no ar úmido. Haja vista a forte dependência de concentração de vapor com a umidade, torna-se imperativo tanto o controle de temperatura como o de umidade.

Segundo Hens, 2003, haverá duas vezes mais insatisfeitos com condições de conforto a 24°C e 70% de umidade relativa do que a 24°C e 40%. Ao mesmo tempo, os ocupantes perceberão que a IAQ é melhor a umidades baixas (na verdade a entalpia) e estudos recentes mostram que taxas de renovação de ar podem ser reduzidas consideravelmente se a entalpia for mantida em níveis moderados.

Ademais, a umidade excessiva em ambientes pode provocar geração de mofo e fungos, além de causar danos aos materiais porosos das edificações, o que tem provocado avanços na área de desenvolvimento de modelos de simulação higrotérmica de edificações (Mendes et al., 2002).

Dada a esta importância da umidade, a Agência Internacional de Energia está promovendo a formação de um novo anexo (IEA, 2003) que é uma extensão do Anexo 24 (IEA, 1996) visando uma cooperação entre 19 países para o melhor entendimento da interação entre a umidade e o consumo de energia em edificações.

Neste sentido, sabe-se que os parâmetros mais importantes do conforto térmico subdividem-se em duas classes: os parâmetros individuais e os parâmetros ambientais: Os parâmetros individuais são a atividade física e o vestuário dos indivíduos no interior do ambiente climatizado. Os parâmetros ambientais são a temperatura, umidade, velocidade do ar e a temperatura média radiante. Estudos permitiram estabelecer uma correlação entre estas informações e a tendência de insatisfação, designada por PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) de um indivíduo dentro da zona térmica. Nesta linha, chega-se ao PMV (*Predicted Mean Vote*), que é um valor quantitativo da sensação térmica dentro de um ambiente, neste contexto, considera-se que valores de PMV entre -0.5 e 0.5 são comumente aceitos em uma situação de conforto térmico (Fanger, 1974).

Apesar da importância supra citada da umidade na análise do conforto em edificações, neste trabalho assume-se uma zona térmica equipada somente com equipamentos de aquecimento, uma vez que esta é uma situação frequentemente encontrada na prática. A zona térmica considerada pode ser, portanto, ilustrada através do

diagrama de blocos da Figura 1.

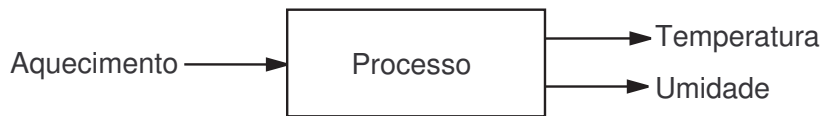


Figura 1: Representação do processo térmico

Desta forma, o objetivo dos sistemas de controle abordados neste artigo é atuar nos equipamentos de aquecimento de modo otimizar o conforto térmico e/ou utilização racional de energia dentro de um recinto. Isto é feito através da alteração dos parâmetros ambientais possíveis de serem controlados com aquecimento, como temperatura e umidade interna do ar, frente a perturbações internas e externas à este ambiente. A metodologia é proposta sabendo-se que o termo conforto térmico deve ser analisado caso a caso e é mais amplo que controle simultâneo de temperatura e umidade. A visão de conforto térmico pode variar de pessoa para pessoa estando estas em um mesmo ambiente. Portanto analisar somente uma variável para a estimativa do conforto térmico não se define como a melhor solução para a resolução deste problema. Porém, dado o impacto das variáveis temperatura e umidade no PMV, tem-se a motivação para a utilização do termo.

### 3. Estratégia de Controle tipo MBPC

Os controladores preditivos ou MBPC são definidos a partir do modelo do processo que se deseja controlar e são caracterizados por quatro etapas principais, descritas a seguir: *i)* Modelagem do processo. O modelo é utilizado para prever o comportamento do processo (previsão da saída) em um horizonte de tempo futuro, denominado horizonte de previsão, utilizando os dados disponíveis dos sinais de entrada e saída do processo. *ii)* Definição de um critério de otimização. O desempenho do sistema em malha fechada durante o horizonte de previsão é especificado através de um critério de custo, definido a partir da saída prevista, do sinal de referência e do esforço de controle. *iii)* Otimização do critério de custo. O critério de custo é otimizado em relação ao conjunto de futuros sinais de controle (horizonte de controle) a serem aplicados no processo durante o horizonte de previsão. *iv)* Aplicação do sinal de controle. Somente o primeiro sinal de controle resultante da otimização do critério de custo é aplicado no processo real e, no instante seguinte de amostragem, todo o procedimento é repetido.

O esquema genérico para controladores MBPC é ilustrado na Figura 2 e, devido a sua estrutura aberta, este esquema deu origem a muitos algoritmos presentes na literatura (Clarke, 1994). As principais diferenças entre as abordagens são devidas ao tipo de modelo utilizado no cálculo da previsão da saída, à definição do critério de custo a ser otimizado e à formulação do problema de otimização do critério.

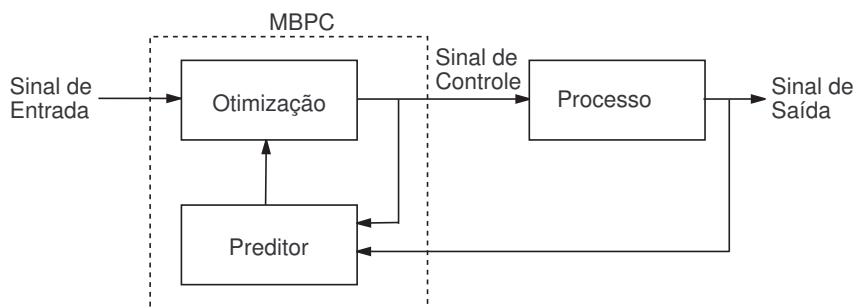


Figura 2: Esquema dos Controladores MBPC

Este artigo aborda o problema de MPBC baseados em modelos lineares com representação em espaço de estados. Na minimização do critério de custo, os aspectos levados em consideração são as restrições no sinal de controle (atuadores do sistema HVAC) e no sinal de saída a fim de manter as condições de conforto térmico requeridas. O compromisso entre desempenho e consumo de energia pode ser também determinado pelo critério de custo. Dentro destas condições descreve-se neste artigo três formulações para resolução do problema de controle de conforto térmico.

A primeira é a solução onde procura-se manter a variável controlada constante (no caso, temperatura) e igual à média da faixa especificada como região de conforto térmico. Esta solução está baseada na utilização clássica de controle preditivo, por exemplo (Zervos and Dumont, 1988) (Oliveira et al., 1996).

Na segunda solução e primeira proposta deste artigo, descreve-se uma metodologia para, mantendo-se a temperatura dentro da região de conforto térmico, minimizar o consumo de energia.

Na terceira e segunda proposta do artigo, faz-se controle simultâneo de temperatura e umidade conforme discutido a seguir. Uma vez que com somente um mecanismo de atuação (no caso, o aquecedor) não é possível levar os sinais de temperatura e umidade de forma independente para os valores de referência, propõe-se uma solução de controle onde o sinal de umidade permanece o mais próximo possível do valor de referência mantendo-se a temperatura dentro da região de conforto.

Segundo a metodologia MBPC, o primeiro passo para a definição da lei de controle é a obtenção de equações de previsão. Portanto, a seguir, o modelo do ambiente analisado é apresentado juntamente com as equação de previsão da saída para temperatura e umidade. O segundo passo é a definição do critério de custo. Assim, define-se nas Seções 3.2 a 3.4, o critério de custo e o problema de otimização resultante para as três estratégias de controle citadas.

### 3.1. Modelo de Previsão

Nesta seção, a equação de previsão do sinal de saída do processo térmico é apresentada. Para fins de previsão, assume que o modelo para temperatura e umidade da zona térmica pode, cada um, ser descrito através da seguinte representação em espaço de estados:

$$\begin{cases} \mathbf{l}(k+1) &= A\mathbf{l}(k) + \mathbf{b}u(k) \\ y(k) &= \mathbf{c}^T\mathbf{l}(k) \end{cases} \quad (1)$$

onde  $u(k)$  é o sinal de acionamento do sistema de aquecimento,  $y(k)$  é o sinal de saída, que pode ser tanto  $y_T(k)$  (modelo de temperatura) quanto  $y_U(k)$  (modelo de umidade),  $\mathbf{l}(k)$  é o vetor de estados e as matrizes  $A$ ,  $\mathbf{b}$  e  $\mathbf{c}$  contêm os parâmetros do sistema térmico e de aquecimento. Este modelo é equivalente a:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{l}(k+1) &= A\Delta\mathbf{l}(k) + \mathbf{b}\Delta u(k) \\ y(k) &= y(k-1) + \mathbf{c}^T\Delta\mathbf{l}(k) \end{cases} \quad (2)$$

onde  $\Delta$  é um operador tal que  $\Delta x(k) = x(k) - x(k-1)$  ou  $\Delta = 1 - q^{-1}$  ( $q^{-1}$  é o operador atraso).

A seguir, calcula-se a equação da previsão da saída  $N$  passos a frente, i.e.,  $\hat{y}(k+N|k)$   $N > 0$ , assumindo que a variação futura no sinal controle é zero, i.e.,  $\Delta u(k+j|k) = 0$  para  $j = 1, \dots, N$ . Este caso equivale a fazer o horizonte de controle igual a 1, solução comum em controladores tipo MBPC. Assim, a partir da equação (2), tem-se que:

$$\hat{y}(k+N|k) = \hat{y}(k+N-1|k) + \mathbf{c}^T\Delta\mathbf{l}(k+N) \quad (3)$$

ou

$$\hat{y}(k+N|k) = \hat{y}(k+N-1|k) + \mathbf{c}^T A^N \Delta\mathbf{l}(k) + \mathbf{c}^T A^{N-1} \mathbf{b} \Delta u(k|k) \quad (4)$$

Após substituições sucessivas em  $\hat{y}(k+N-1|k)$ , obtém-se (Oliveira et al., 1999):

$$\hat{y}(k+N|k) = y(k) + \mathbf{c}^T (K_N - I) \Delta\mathbf{l}(k) + \mathbf{c}^T K_{N-1} \mathbf{b} \Delta u(k|k) \quad (5)$$

sendo  $K_N = \sum_{i=0}^{N-1} A^i$  e  $I$  a matriz identidade de mesma ordem que  $A$ .

A equação (5) pode ser reescrita como:

$$\hat{y}(k+N|k) = \beta \Delta u(k|k) + \hat{y}_l(k+N|k) \quad (6)$$

com

$$\beta = \mathbf{c}^T K_{N-1} \mathbf{b} \quad (7)$$

$$\hat{y}_l(k+N|k) = y(k) + \mathbf{c}^T (K_N - I) \Delta\mathbf{l}(k) \quad (8)$$

Nota-se que a previsão da saída é função de dois termos relacionados, de forma independente, com ação de controle e estado do sistema no instante  $k$ .

O processo térmico analisado neste trabalho possui duas variáveis controladas (temperatura e umidade) e uma variável manipulada (acionamento do aquecedor), conforme ilustrado na Figura (1). Portanto, duas equações de previsão são definidas, uma para a relação entre a variação no sinal de controle  $\Delta u(k|k)$  (aquecimento) e  $y_T(k+N|k)$  (previsão da temperatura interna no instante  $k+N$ , realizada em  $k$ ) e outra para a relação entre  $\Delta u(k|k)$  e  $y_U(k+N|k)$  (previsão da umidade interna no instante  $k+N$ , realizada em  $k$ ).

### 3.2. Solução 1: Controle de temperatura com sinal de referência constante

Nesta seção, descreve-se uma estratégia de controle tipo MBPC para o sistema térmico onde o conforto térmico é especificado em termos de um valor desejado (único) para a temperatura interna do ambiente.

A lei de controle é definida através do cálculo de um sinal de controle de forma que a seguinte igualdade seja satisfeita:

$$w_T = y_T(k + N|k) \quad (9)$$

onde  $w_T$  é o sinal de referência, i.e., o valor desejado para a temperatura interna. A solução desta lei de controle é obtida igualando a equação de previsão (6) com a equação (9), conforme apresentado a seguir:

$$w_T = \beta_T \Delta u(k|k) + \hat{y}_{T,l}(k + N|k) \quad (10)$$

ou

$$\begin{cases} \Delta u(k|k) = [w_T - \hat{y}_{T,l}(k + N|k)] / \beta_T \\ u(k) = u(k - 1) + \Delta u(k|k) \end{cases} \quad (11)$$

Nesta equação,  $\beta_T$  é uma constante calculada em função do modelo de temperatura e  $y_{T,l}(\cdot|k)$  é a parcela da previsão da temperatura interna calculada em função do modelo de temperatura e do estado atual do sistema, conforme equações (1), (7) e (8).

### 3.3. Solução 2: Controle de temperatura com faixa para o sinal de referência e minimização do consumo de energia

Nesta seção, descreve-se uma estratégia de controle tipo MBPC para o sistema térmico onde o conforto térmico é especificado em termos de uma faixa de valores desejados para a temperatura ambiente. Procura-se um valor para o sinal de controle que minimize o consumo de energia e garanta que a temperatura ambiente esteja dentro da faixa pré-especificada.

A lei de controle é definida através do seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u(k|k)} \quad & u(k) \\ \text{s.a.} \quad & w_{T,min} \leq \hat{y}_{T,l}(k + N) \leq w_{T,max} \\ & 0 \leq u(k) \end{aligned} \quad (12)$$

onde  $w_{T,min}$  e  $w_{T,max}$  definem a faixa de valores de temperatura associadas à condição de conforto térmico. Neste problema, o critério de custo é função do consumo de energia. O primeiro conjunto de restrições do problema de otimização garante a permanência do sinal de temperatura dentro da faixa desejada e o segundo conjunto são restrições de não negatividade no sinal de controle, uma vez que somente um aquecedor está presente (não há retirada de energia do ambiente). Substituindo a equação (6) no problema (12), obtém-se:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u(k|k)} \quad & \Delta u(k|k) + u(k - 1) \\ \text{s.a.} \quad & w_{T,min} - \hat{y}_{T,l}(k + N|k) \leq \beta_T \Delta u(k|k) \leq w_{T,max} - \hat{y}_{T,l}(k + N|k) \\ & 0 \leq \Delta u(k|k) + u(k - 1) \end{aligned} \quad (13)$$

ou

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u(k|k)} \quad & \Delta u(k|k) \\ \text{s.a.} \quad & \beta_T \Delta u(k|k) \leq w_{T,max} - \hat{y}_{T,l}(k + N|k) \\ & -\beta_T \Delta u(k|k) \leq -w_{T,min} + \hat{y}_{T,l}(k + N|k) \\ & -\Delta u(k|k) \leq u(k - 1) \end{aligned} \quad (14)$$

Este problema de otimização é um problema de programação linear na variável  $\Delta u(k|k)$ , cuja solução é amplamente conhecida na literatura. Sua solução a cada instante de amostragem produz um sinal ótimo de controle que garante conforto térmico, sob o ponto de vista manutenção da temperatura ambiente dentro de uma faixa pré-especificada, com menor consumo possível de energia.

### 3.4. Solução 3: Controle de temperatura com faixa para o sinal de referência e otimização da umidade

Nesta seção, descreve-se uma estratégia de controle tipo MBPC para o sistema térmico onde o conforto térmico é especificado em termos de uma faixa de valores desejados para a temperatura ambiente e de um valor objetivo para a umidade relativa interna. Procura-se um valor para o sinal de controle que, mantendo a temperatura ambiente dentro da faixa pré-especificada, faça com que o sinal de umidade chegue o mais próximo possível do objetivo.

A lei de controle é definida através do seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u(k|k)} \quad & (\hat{y}_U(k+N|k) - w_U)^2 \\ \text{s.a.} \quad & w_{T,min} \leq \hat{y}_T(k+N|k) \leq w_{T,max} \\ & 0 \leq u(k) \end{aligned} \quad (15)$$

onde  $y_U(\cdot|k)$  é a previsão da umidade interna do ambiente e  $w_U$  é o sinal de referência, i.e., o valor desejado para a umidade interna. Neste problema, o critério de custo representa uma medida de distância da umidade interna em relação ao valor objetivo, no caso, o quadrado da norma 2 (Euclidiana). O primeiro e segundo conjuntos de equações são equivalentes ao problema (12). Substituindo a equação (6) para a temperatura e umidade no problema (15), obtém-se:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u(k|k)} \quad & \beta^2 \Delta u^2(k) + 2\beta(\hat{y}_{U,i}(k+N|k) - w_U)\Delta u(k) \\ \text{s.a.} \quad & \beta_T \Delta u(k|k) \leq w_{T,max} - \hat{y}_{T,i}(k+N|k) \\ & -\beta_T \Delta u(k|k) \leq -w_{T,min} + \hat{y}_{T,i}(k+N|k) \\ & -\Delta u(k|k) \leq u(k-1) \end{aligned} \quad (16)$$

Nesta equação,  $\beta_U$  é uma constante calculada em função do modelo de umidade e  $y_{U,i}(\cdot|k)$  é a parcela da previsão da umidade interna calculada em função do modelo de umidade e do estado atual do sistema, conforme equações (7) e (8). Este é um problema de programação quadrática, cuja solução também é amplamente conhecida na literatura. Sua solução a cada instante de amostragem produz um sinal ótimo de controle que garante conforto térmico, sob o ponto de vista de minimização da distância entre a umidade interna e o valor objetivo e manutenção da temperatura ambiente dentro de uma faixa pré-especificada.

## 4. Resultados de Simulação

Nesta seção, descreve-se um exemplo de simulação de controle de um ambiente climatizado para ilustrar as propriedades e características dos métodos descritos na seção anterior, cujas dimensões são 5,4m×3,25m×3,00m de comprimento, largura e altura e com interação com o meio externo através de convecção e radiação solar por uma parede de 16,2m<sup>2</sup>. A função de transferência em tempo discreto que descreve o comportamento dinâmico do processo, obtida através da aplicação de métodos de identificação paramétrica (Ljung, 1999) com dados reais de uma zona térmica descrita em (Virk and Loveday, 1994), é dada por:

$$\begin{aligned} (1 - 1,372z^{-1} + 0,485z^{-2} - 0,07z^{-3})y_T(z) = & (-0,165z^{-1} + 0,127z^{-2} + 0,038z^{-3})y_U(z) \\ +(+0,293z^{-1} + 0,0387z^{-2} - 0,272z^{-3})u(z) + & (-0,8228z^{-1} + 1,598z^{-2} - 0,7616z^{-3})T_0(z) \\ & +(+0,024z^{-1} - 0,043z^{-2} + 0,019z^{-3})U_0(z) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} (1 + 1,335z^{-1} + 0,363z^{-2} - 0,012z^{-3})y_U(z) = & +(-0,078z^{-1} + 0,06z^{-2} + 0,029z^{-3})y_T(z) \\ +(-0,0076z^{-1} + 0,0018z^{-2} + 0,0035z^{-3})u(z) + & (+0,063z^{-1} - 0,045z^{-2} - 0,006z^{-3})T_0(z) \\ & +(+0,0136z^{-1} + 0,0714z^{-2} - 0,0714z^{-3})U_0(z) \end{aligned} \quad (18)$$

onde  $y_T(z)$  e  $y_U(z)$  são os sinais de temperatura e umidade interna do ambiente, em °C e %.  $T_o(z)$  e  $U_o(z)$  são os sinais de temperatura e umidade externa. Tais modelos apresentam as variações da temperatura e umidade relativa no interior do ambiente simulado, possibilitando que condições climáticas genéricas possam ser aplicadas como perturbações nas variáveis  $T_o(z)$  e  $U_o(z)$ .  $u(z)$  (aquecimento) como o ponto de atuação do controlador projetado.

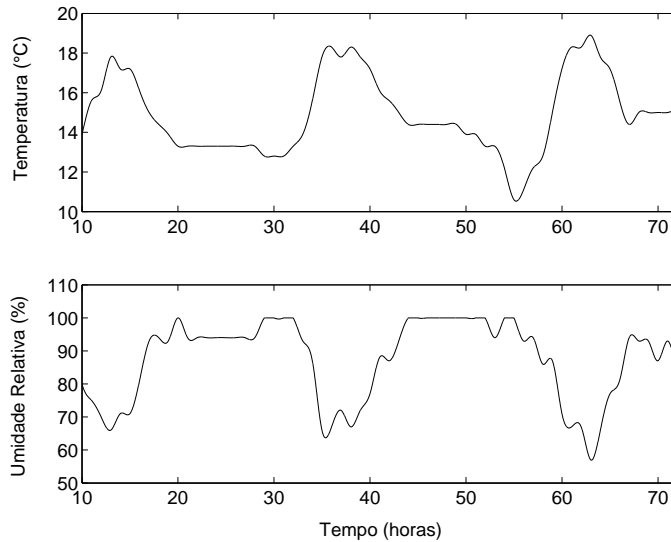


Figura 3: Temperatura e umidade externas para três dias de julho.

Em todos as situações simuladas, utilizaram-se parâmetros climáticos de três dias do mês de julho para a cidade de Curitiba. Os gráficos correspondentes à situação analisada são apresentados na Figura 3, começando às 10 horas do primeiro dia e terminando à meia noite do terceiro.

No primeiro exemplo de simulação, analisa-se o comportamento do sistema de controle de temperatura para a solução descrita na Seção 3.2. O sistema em malha fechada, quando o controlador é ligado no início do terceiro dia é ilustrado na Figura 4. O sinal de referência para a temperatura ambiente é  $24^{\circ}C$ . Através desta figura, nota-se que o sistema de controle mantém a temperatura interna constante (com variações bem pequenas) no valor de referência, apesar das perturbações externas presentes no sistema. O consumo de energia durante o dia em que o aquecimento está acionado é de  $4,45kWh$ .

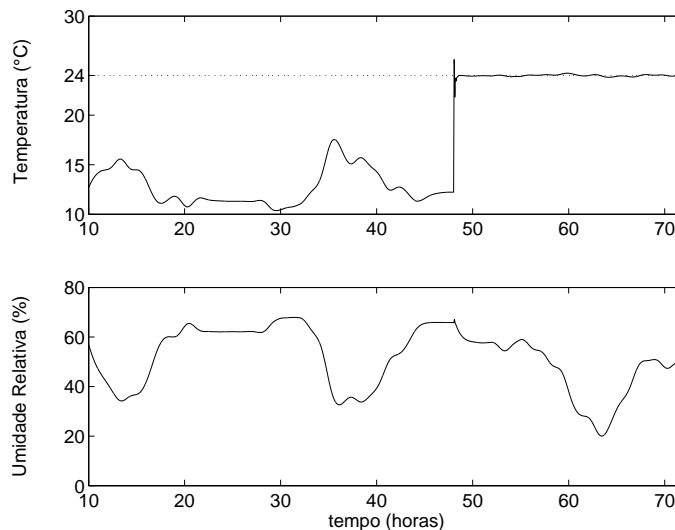


Figura 4: Evolução de temperatura e de umidade utilizando controlador apresentado como solução 1.

O sistema em malha fechada, para a solução de controle descrita na Seção 3.3 (segundo exemplo), com acionamento do controlador no início do terceiro dia é ilustrado na Figura 5. A faixa de valores desejada para o sinal de temperatura ambiente é  $24 \pm 2^{\circ}C$ . Através desta figura, nota-se que a temperatura interna permanece dentro da faixa especificada apesar das perturbações presentes no sistema devido ao clima externo. Entretanto, o consumo de energia durante o dia em que o aquecimento está acionado é de  $3,67 kWh$ , i.e., 17,6% menor que para o sistema de controle descrito na Seção 3.2. Isto é devido ao fato que o sistema trabalha no limite inferior da faixa factível para economia de energia. Os sinais de controle dos dois sistemas citados são apresentados na

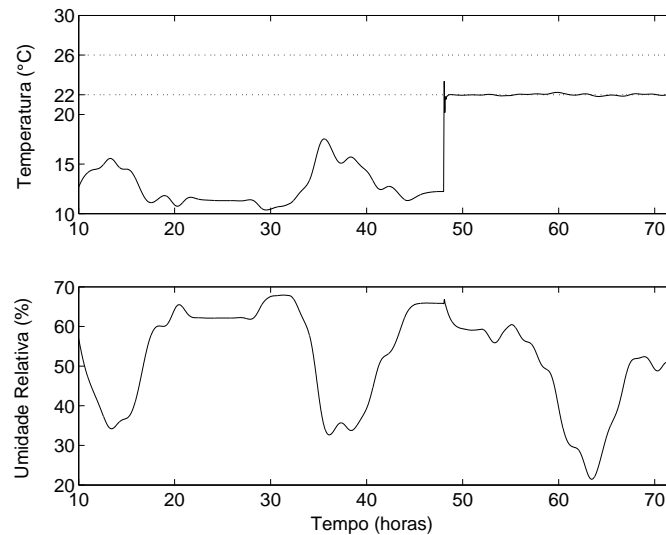


Figura 5: Evolução de temperatura e de umidade utilizando controlador apresentado como solução 2.

Figura 6. Percebe-se que é possível obter sempre o menor consumo de energia, diferenciando-se dos controladores convencionais aplicados a sistemas de climatização, tanto residenciais quanto industriais.

O terceiro exemplo de simulação - referente a Seção 3.4 - é descrito a seguir. O mesmo padrão para o acionamento do controlador dos outros exemplos é adotado aqui e a faixa de valores para o sinal de referência de temperatura ambiente também é de  $24 \pm 2^\circ C$ . Para fins ilustrativos, dois valores de referência são adotados para a umidade interna: 60% e 30%. O sistema em malha fechada para estas duas situações é ilustrado pelas Figuras 7 e 8. Nota-se que, nos dois casos, a temperatura permaneceu dentro das faixa pré-especificada e a umidade ficou o mais próximo possível do valor de referência.

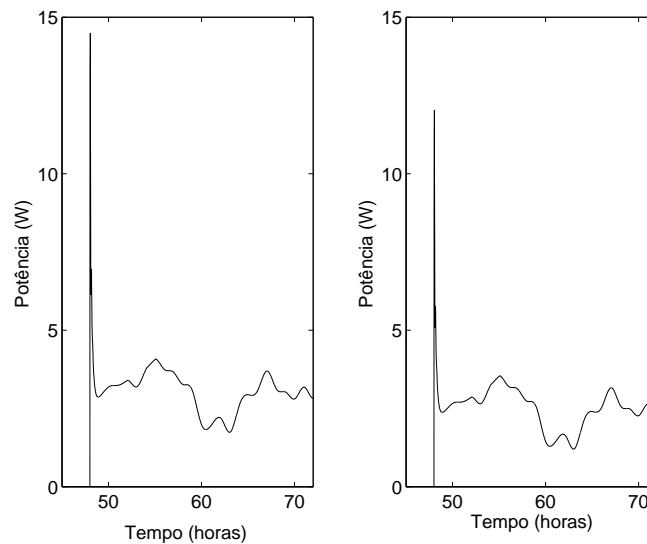


Figura 6: Comparação entre sinais de controle utilizando soluções 1 e 2.

No caso da Figura 7, o valor de temperatura no qual a umidade mais se aproxima de 60% é o menor valor dentro da faixa factível, i.e.,  $22^\circ C$ . Valores maiores de temperatura tenderiam a baixar ainda mais a umidade interna, afastando-a do valor objetivo. A maior diferença entre os resultados apresentados nas Figuras 5 e 7 ocorre logo após o acionamento do aquecedor quando a umidade interna é maior que o valor objetivo. Neste momento, o controlador eleva a temperatura ambiente a fim de baixar a umidade aproximando-a do valor objetivo.

O valor objetivo de umidade relativa no caso apresentado na Figura 8 é 30%. Nesta situação, o controlador tende a aumentar a temperatura interna a fim de baixar a umidade relativa aproximando do valor 30% desejado.



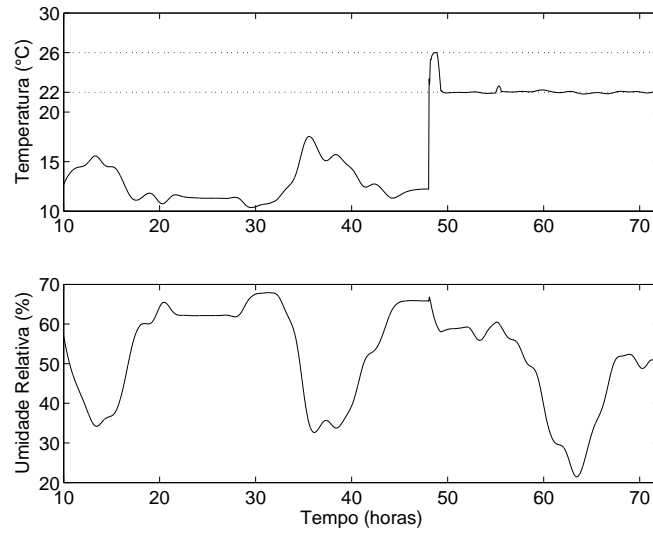


Figura 7: Evolução de temperatura e de umidade utilizando controlador apresentado como solução 1. Valor objetivo de umidade igual a 60 %.

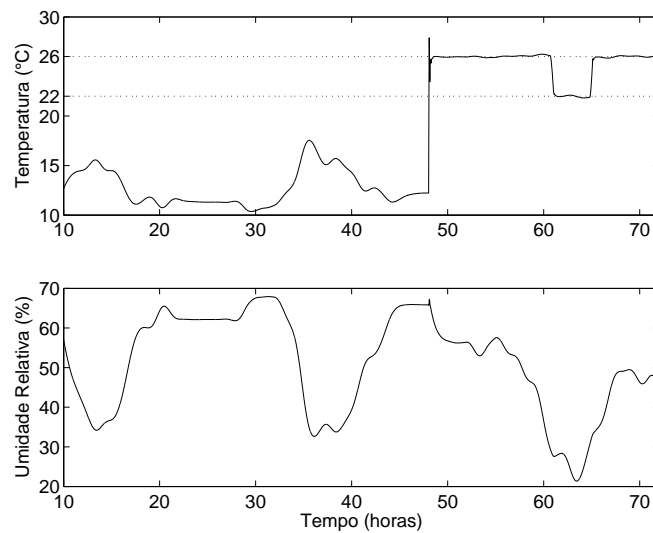


Figura 8: Evolução de temperatura e de umidade utilizando controlador com critério de consumo de menor energia e máximo valor de umidade igual a 30 %.

Esta situação é mantida durante quase todo o tempo em que o sistema de controle esteve atuando. Pode-se observar que, durante um espaço de tempo, a influência da umidade externa faz a interna cair a níveis menores que o objetivo. Neste período, o controlador diminui a temperatura interna a fim de diminuir a tendência de queda da umidade.

O consumo de energia total do sistema de aquecimento foi de  $3,73kWh$  (pouco maior que o mínimo) e  $4,97kWh$  (26,24 % maior que o mínimo), para o valor objetivo de 60% e 30%, respectivamente. Este consumo de energia, comparado com o consumo apresentado pela solução 2, reflete o objetivo da lei de controle. Na solução 2, a prioridade é o redução de consumo e este é o menor de todos os casos analisados. Na solução 3, a prioridade é a umidade e, portanto, o consumo ficou em segundo plano. Este pode ser até o mais elevado dos casos analisados se o objetivo for manter a umidade bem baixa.

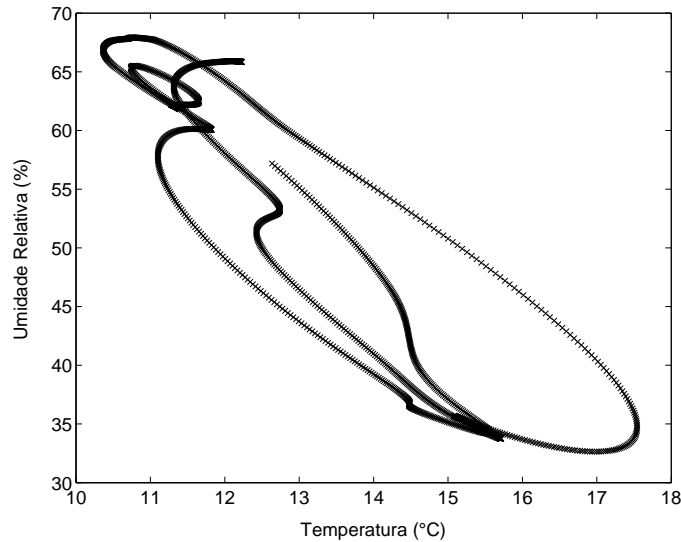


Figura 9: Relação entre umidade relativa e temperatura do ambiente com sistema de controle desligado.

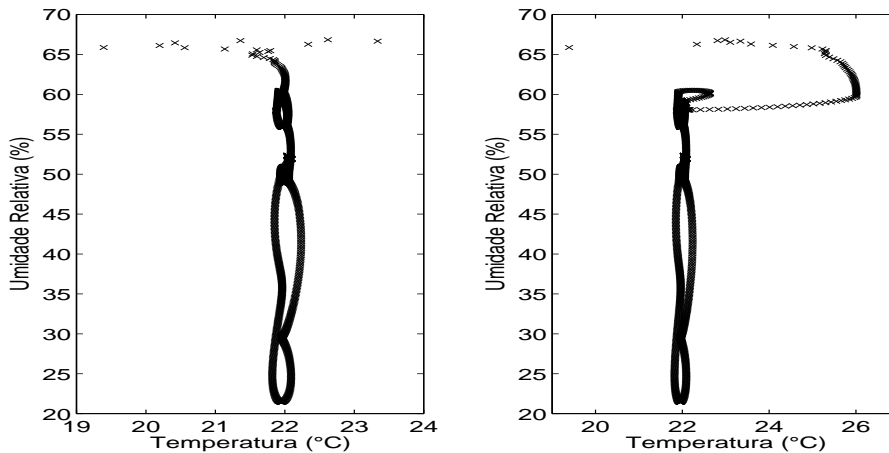


Figura 10: Relação entre umidade e temperatura para as soluções 1 (esquerda) e 2 (direita).

Na Figura 9 torna-se possível visualizar a relação entre a umidade relativa e a temperatura interna do ambiente (semelhante à carta psicrométrica) antes do período em que o controlador é acionado. Já na Figura 10, mostra-se estes dados para os casos apresentados nas Figuras 5 e 7.

Percebe-se através da Figura 10 que para manter um valor de umidade próximo do valor objetivo em um valor previamente estipulado, sendo considerado o valor da umidade relativa interna do ambiente superior a este, neste caso 60%, há a necessidade de um fornecimento extra de calor para que a umidade relativa interna do ambiente baixe, acarretando, neste caso um maior consumo de energia. Nota-se no gráfico apresentado (Figura 10) que valores de umidade maiores que 60% foram evitados na solução 2 através da utilização do grau de

liberdade disponível (aumento de temperatura), comprovando-se assim o controle de umidade do sistema.

## 5. Conclusões

Este artigo focou-se no problema de controle de condições assimétricas para conforto térmico em edificações com sistemas de aquecimento. O conforto térmico foi estabelecido em termos de uma faixa de valores objetivos para temperatura e umidade relativa. Descreveram-se três estratégias de controle para lidar com este problema, todas utilizando a técnica de controle preditivo conhecida como MBPC. Na primeira, determinou-se um valor de referência para o sinal de temperatura igual ao valor médio da faixa de conforto. Na segunda, procurou-se obter uma solução de consumo mínimo de energia mantendo a temperatura dentro da faixa de conforto. Na terceira, incorporou-se à condição de conforto um valor de referência de umidade interna e garantindo-se uma distância mínima da umidade interna em relação à este valor dentro das restrições impostas para a temperatura.

Comprova-se desta forma a possibilidade de utilização de sistemas de controle mais eficientes em equipamentos HVAC, fornecendo uma economia maior dos recursos energéticos sem a necessidade de alterar os padrões do ambiente climatizado.

Um exemplo de simulação baseado em um modelo identificado a partir de dados de um ambiente real foi apresentado. Dentro de cada proposta, as três abordagens tiveram comportamentos satisfatórios. A segunda e terceira soluções representam um compromisso entre conforto térmico e consumo de energia uma vez que, com somente uma variável manipulada (o acionamento do aquecedor), não é possível minimizar os dois critérios isoladamente.

A partir dos resultados apresentados comprova-se que o controle baseado em níveis de conforto utilizando técnicas preditivas de controle proporcionam melhor conforto térmico e menor consumo de energia do que as técnicas convencionais baseadas em termostatos.

## 6. Referências

- Astrom, K. J., Hagglund, H., and Wallenborg, A., 1993, Automatic Tuning of Digital Controllers with Applications to HVAC Plants, “Automatica”, Vol. 29, No. 5, pp. 1333–1343.
- Camacho, E. F. and Bordons, C., 1995, “Model Predictive Control in Process Industry”, Springer Verlag.
- Chen, Y. H. and Lee, K. M., 1990, Adaptive Robust Control Scheme Applied to a Single-Zone HVAC System, “ASHRAE Transactions”, Vol. SL-16, No. 4, pp. 896–903.
- Clarke, D. W., editor, 1994, “Advances in Model Based Predictive Control”, Oxford University Press.
- Clarke, J. A., editor, 2001, “Energy Simulation in Building Design”, Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Dumur, D. and Boucher, P., 1994, Predictive Control Application in the Machine-tool Field, Clarke, D. W., editor, “Advances in Model Based Predictive Control”, pp. 498–515. Oxford University Press.
- Fanger, P. O., 1974, “Thermal Comfort”, McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- Hamdi, M. and 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.
- Hens, H., 2003, Proposal for a new annex. Whole building heat, air and moisture response (MOIST-ENG), Technical report, Belgium.
- IEA, 1996, International Energy Agency - Annex 24 - Final Report, Heat, Air, and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Technical report, Modelling, Belgium.
- IEA, 2003, International Energy Agency - Annex 41 - Whole building heat, air and moisture response MOIST-ENG, Technical report, Modelling, Belgium.
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G. S., Lalaitzakis, K., and 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.
- Ljung, L., 1999, “System Identification: Theory for the user”, Prentice Hall, Inc., 2 edition.
- Mendes, N., Philippi, P., and Lamberts, R., 2002, A New Mathematical Method to Solve Highly-Coupled Equations of Heat and Mass Transfer in Porous Media, “International Journal of Heat and Mass Transfer”, Vol. 45/3, pp. 509–518.
- Oliveira, G. H. C., Amaral, W. C., and Favier, G., 1999, Adaptive Predictive Controller using Orthonormal Series Functions, “Applied Mathematics and Computer Science”, Vol. 9, No. 1, pp. 175–192.
- Oliveira, G. H. C., Araújo, H. X., Mendes, N., and Coelho, L. S., 2001, Utilizando Lógica Nebulosa no Controle de Sistemas de Aquecimento, “Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica”, Uberlândia/MG.
- Oliveira, G. H. C., Lopez, J. F., Favier, G., and Amaral, W. C., 1996, Review of Predictive Control Methods using Laguerre Functions, “Proc. of IEEE/IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications - CESA, Symposium on Control Optimization and Supervision”, Vol. 1, pp. 304–309, Lille/France.

- Virk, G. S. and Loveday, D. L., 1994, Model-Based Control for HVAC Applications, “Proc. of The Third IEEE Conference on Control Applications”, pp. 1861–1866, Glasgow.
- Wang, Q. G., Hang, C. C., Zhang, Y., and Bi, Q., 1999, Multivariable Controller Auto-Tuning with Its Application in HVAC Systems, “Proc. of American Control Conference”, pp. 4353–4356, San Diego/California.
- Zervos, C. C. and Dumont, G. A., 1988, Deterministic Adaptive Control Based on Laguerre Series Representation, “International Journal of Control”, Vol. 48, No. 6, pp. 2333–2359.

## 7. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## PREDICTIVE CONTROL APPLIED TO HEATING SYSTEMS FOR REDUCING ENERGY CONSUMPTION AND IMPROVING THERMAL COMFORT INDICES

### Roberto Zanetti Freire

Pontifical Catholic University of Paraná - PUCPR/CCET  
Rua Imaculada Conceição, 1155 Curitiba - PR, 80.215-901 - Brazil  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS  
roberto.freire@pucpr.br

### Gustavo Henrique da Costa Oliveira

Pontifical Catholic University of Paraná - PUCPR/CCET  
Rua Imaculada Conceição, 1155 Curitiba - PR, 80.215-901 - Brazil  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS  
gustavo.oliveira@pucpr.br

### Nathan Mendes

Pontifical Catholic University of Paraná - PUCPR/CCET  
Rua Imaculada Conceição, 1155 Curitiba - PR, 80.215-901 - Brazil  
Thermal Systems Laboratory - LST  
nathan.mendes@pucpr.br

**Abstract.** *HVAC (Heating, ventilation and Air-Conditioning) systems are often based on temperature control. Some thermal-comfort based systems have also humidifiers/dehumidifiers to simultaneously control indoor air temperature and relative humidity. In this work, Model Based Predictive Control (MBPC) techniques are proposed to optimize psychrometrics conditions focused on thermal comfort and/or energy consumption in only-one-actuator systems associated to heaters. Simulation results - obtained by using TRY (Test Reference Year) weather data for the city of Curitiba - are presented to validate the proposed methodology in terms of temperature and relative humidity control and energy consumption..*

**Keywords .** *HVAC systems, predictive control, thermal comfort, energy efficiency.*