

CONTROLE MULTIMALHA DE TEMPERATURA E UMIDADE DO AR EM UM AMBIENTE CONSTRUÍDO UTILIZANDO CONTROLADORES PID

Ives Soares de Oliveira (1); Ronilson Rocha(2); Henor Artur de Souza (3)

- (1) Departamento de Engenharia de Controle e Automação e de Técnicas Fundamentais - Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto – MG.
e-mail: ives.so@terra.com.br; rocha@em.ufop.br.
- (2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Área de Construção Metálica – Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP. e-mail: henor@ufop.br

RESUMO

A eficiência energética de uma edificação está associada à obtenção das condições necessárias de conforto ao usuário com um adequado desempenho térmico. Geralmente, um ambiente construído necessita de uma climatização mecânica para manter as condições internas de conforto humano, o que requer o controle da temperatura e da umidade do ar do ambiente. Neste trabalho avalia-se o uso de controladores PID para controlar simultaneamente a temperatura e a umidade do ar de um ambiente construído. A partir de um modelo matemático das interações térmicas na construção que leva em conta as características do ambiente interno (perfil de ocupação, equipamentos, iluminação) e as variáveis climáticas externas, a ação dos controladores PID para a regulação da temperatura e umidade de um ambiente interno é simulada computacionalmente. Os resultados mostram que o sistema de controle proposto apresenta um tempo de estabilização adequado, permitindo um controle eficiente das condições do ambiente (temperatura e umidade).

ABSTRACT

The energy efficiency of a building is associated to necessary conditions for user comfort with an adequate thermal performance. In general, an environment needs a mechanical climatization to maintain the internal conditions of human comfort, which request the control of air temperature and moisture. In this work, the use of PID controllers for simultaneous control of the air temperature and moisture in an environment is evaluated. From a mathematical model of the thermal interactions in the building that considers the characteristics of the internal environment (profile of the occupation, equipments and illumination) and the external weather variables, the action of the PID controllers in the regulation of the temperature and moisture of an internal environment is computationally simulated. The results show that proposed control system presents an adequate time for stabilization, allowing an efficient control of the environment (temperature and moisture).

1. INTRODUÇÃO

O estudo do conforto humano em uma edificação está associado ao seu desempenho térmico, sendo que um condicionamento deficiente e/ou inadequado provoca sintomas desagradáveis em seus usuários, tais como cansaço, desânimo, falta de concentração nas atividades desempenhadas e saídas freqüentes do local de trabalho, levando a pessoa a um grau de insatisfação com relação ao ambiente onde se encontra. O estudo do conforto térmico está relacionado à avaliação das condições do ambiente interno com relação ao conforto proporcionado aos seus ocupantes, envolvendo o bem estar do ser humano dentro do ambiente construído. Tais condições são ditadas basicamente pelo valor da temperatura e da umidade do ar no ambiente interno, variáveis influenciadas pelos parâmetros climáticos externos (radiação solar e características do ar tais como umidade relativa, pressão, velocidade e temperatura) e pelas cargas térmicas internas (atividades humanas, iluminação artificial e equipamentos), (TRIBESS et al., 1997; PINTO et al., 2001; SOUZA et al., 2003).

As condições de conforto térmico de uma edificação podem ser avaliadas, de forma aproximada, por meio de modelos matemáticos das trocas térmicas nos componentes de edificações e dados experimentais com observação *in loco* do ambiente já construído. Estes modelos devem levar em conta o perfil de ocupação da edificação, uma vez que este determina as principais fontes internas de calor (lâmpadas, ocupantes e equipamentos internos), bem como o tipo de atividade exercida no ambiente construído, uma vez que a taxa de liberação de calor por ocupante varia em função da mesma. Dependendo do perfil de ocupação do ambiente podem-se ter ainda mecanismos de transferência de calor associados aos processos de transferência de massa que podem ocorrer. As condições climáticas locais, caracterizadas pela temperatura de bulbo seco, umidade do ar, radiação solar, direção e velocidade do vento, também são determinantes para a avaliação das interações térmicas entre o ambiente externo e interno através da envoltória (fachadas e cobertura) da edificação. O armazenamento de energia térmica que ocorre nos fechamentos da edificação influi nos efeitos que as variáveis climáticas exercem sobre a temperatura do ar interior, que será tão mais atenuada quanto maior for a inércia térmica da edificação (AKUTSU, 1998).

Quando a climatização mecânica de um ambiente construído é necessária para a obtenção das condições desejadas de conforto, é imprescindível a existência de um sistema de controle visando assegurar certas especificações de projeto e/ou um comportamento particular das variáveis de conforto, de forma a permanecerem o mais próximo possível de um valor de referência.

Uma planta de ar condicionado consiste em um sistema multivariável não linear com parâmetros distribuídos, com tempo morto e de fase não mínima, de maneira que um sistema de controle baseado em controladores PID não apresenta necessariamente um desempenho satisfatório. Por essa razão, o projeto do controlador PID deve ser robusto, considerando as incertezas do modelo causadas pelas variações nas características da planta (KASAHARA *et al.*, 1999). Neste contexto, a seleção da malha de controle apropriada deve levar em conta todo o conhecimento prévio disponível. Para a aplicação de controle em ambientes condicionados, os controladores podem ser classificados nas seguintes categorias (DEXTER *et al.*, 1990):

- Controladores PID sintonizados utilizando a regra Ziegler-Nichols baseada na resposta do sistema em malha aberta a uma entrada em degrau,
- Controladores PID sintonizados utilizando a regra de Ziegler-Nichols baseada no “ganho último”,
- Algoritmos baseados em modelos, onde os parâmetros do controlador PID são relacionados com o modelo da planta,
- Controladores baseado na estimação recursiva de parâmetros em malha fechada,
- Algoritmos baseados em regras empíricas, nos quais os parâmetros do controlador de PID são determinados a partir de um conjunto de regras de heurísticas.

Guang e Geary (1993) e Kasahara *et al* (1999) observaram que controladores PID para ambientes condicionados sintonizados utilizando a regra de Ziegler-Nichols do “ganho último” apresentam características mais conservativas do àquelas baseadas na resposta ao degrau. Rahmati *et al.*(2003)

propõe um sistema de controle híbrido de lógica *fuzzy* e PID, com desempenho muito robusto, flexível e alternativo.

Na Figura 1 ilustra-se um esquema de controle multimalha das condições de conforto de um ambiente construído. A temperatura T e a umidade W do ambiente são medidas e comparadas com valores de referências. Os desvios resultantes destas comparações são processados pelos controladores automáticos do processo, que geram sinais de entrada para a planta que permitem reduzir estes erros a valores aceitáveis. Desta forma, o sistema de controle determina as taxas mais adequadas de calor e de renovação de ar que o sistema de condicionamento deve manter com o ambiente construído visando assegurar as condições desejadas de conforto.

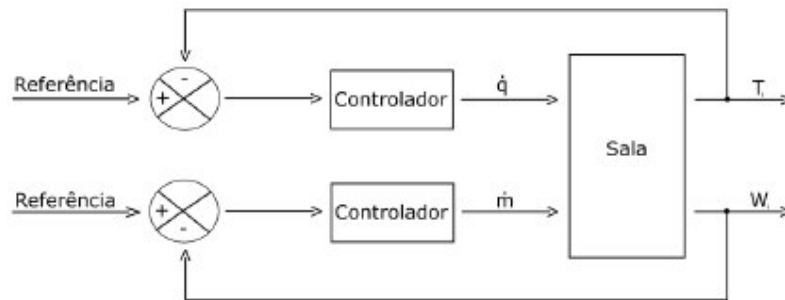


Figura 1 – Diagrama de blocos de um sistema de controle das condições de conforto de um ambiente

Neste trabalho avalia-se o controle multimalha da temperatura e da umidade do ar de um ambiente construído, utilizando controladores PID. Um modelo matemático das interações térmicas no ambiente construído é desenvolvido considerando as características do ambiente interno (perfil de ocupação, equipamentos, iluminação) e as variáveis climáticas locais. O comportamento do sistema é simulado computacionalmente considerando a ação dos controladores PID para a regulação da temperatura e umidade interna do ambiente interno.

2. MODELO MATEMÁTICO DO AMBIENTE

Para avaliação do desempenho de um sistema de controle de temperatura e umidade é necessário que a análise seja feita considerando-se a resposta global da edificação em relação às interações térmicas com o meio externo. Isso é feito por meio de um balanço de energia, o qual leva em conta as trocas térmicas entre o ambiente externo e o ambiente interno através dos elementos de fechamento e das fontes internas de calor que dependem do perfil de ocupação do ambiente juntamente com os equipamentos existentes e iluminação interna. Os processos de transferência de calor associados aos processos de transferência de massa também são relevantes. Levam-se em conta a condução de calor através dos elementos da envoltória, a radiação e a convecção de calor, internas e externas.

Na Figura 2 representam-se as interações térmicas que ocorrem entre os ambientes interno e externo através de elementos de fechamento e as fontes internas de calor.

O ambiente externo é caracterizado pela temperatura e umidade do ar, T_e e W_e , respectivamente. O ambiente interno é caracterizado pela temperatura e umidade do ar, T_i e W_i , respectivamente. Por meio do balanço de energia e massa, o comportamento do sistema pode ser descrito pelas seguintes equações:

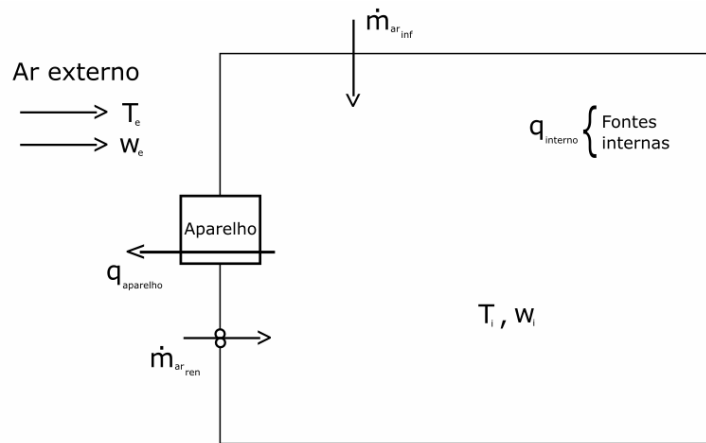


Figura 2 – Trocas térmicas entre os ambientes interno e externo

$$\rho_{ar} \cdot V \cdot c_p \frac{dT}{dt} = \dot{m}_{ar_{ren}} [c_p (T_e - T_i) + h_{lv} (W_e - W_i)] + UA(T_e - T_i) + q_{inf} + q_{int} + q_{pert} + q_{ap} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\rho_{ar} \cdot V \cdot \frac{dW}{dt} = \dot{m}_{ar_{ren}} (W_e - W_i) \quad [\text{Eq. 2}]$$

onde c_p é o calor específico do ar à pressão constante, ρ_{ar} é a massa específica do ar, h_{lv} é a entalpia de vaporização, V é o volume da sala, U é coeficiente global de transferência de calor, que leva em consideração a transferência de calor através do sistema fechamento e as parcelas de convecção e radiação de calor internas e externas, $\dot{m}_{ar_{ren}}$ é a taxa de renovação do ar que o equipamento fornece ao ambiente, q_{ap} é a taxa de calor que o equipamento fornece ao ambiente, q_{int} é a taxa de calor gerado internamente, q_{inf} é a taxa de calor devido ao processo de infiltração do ar e q_{pert} é taxa de calor que entra ou sai do ambiente devido a perturbações, caracterizadas pelo abrir/fechar de portas e janelas, ligar/desligar lâmpadas e/ou acionar equipamentos.

3. SISTEMA DE CONTROLE

3.1. Controle Multimalha

Os problemas de controle MIMO (várias entradas, várias saídas) são inerentemente mais complexos que os problemas SISO (uma entrada, uma saída) devido às interações que ocorrem entre as variáveis controladas y e as variáveis manipuladas u . Considerando que a ação de um distúrbio sobre a saída y_j , as variações na entrada u_l apresentam um efeito direto e um efeito indireto devido às interações entre as malhas, gerando duas ações de controle simultâneas que dificultam a sintonia dos controladores e podem desestabilizar o sistema em malha fechada conforme ilustrado na Figura 3. Embora seja uma metodologia de projeto mais simples e menos poderosa, a abordagem frequentemente adotada consiste em ignorar a natureza multivariável da planta e projetar controladores SISO para cada par entrada-saída. Neste contexto, é primordial uma seleção adequada dos pares u - y , uma vez que a escolha incorreta pode resultar em um desempenho pobre do sistema em malha fechada e na redução das margens de estabilidade (SEBORG et al., 1989).

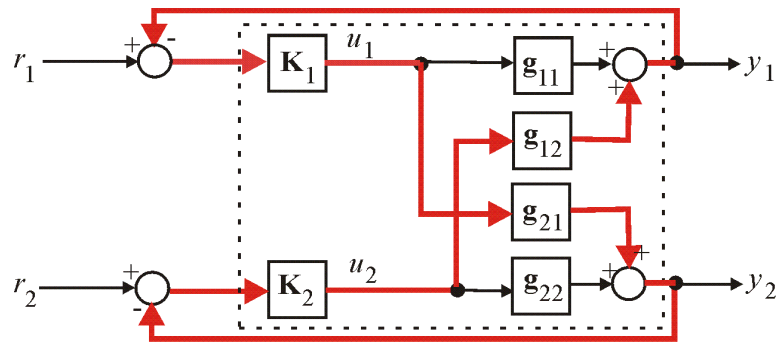


Figura 3 – Interações entre malhas de controle.

Com o propósito de reduzir os efeitos indesejáveis introduzidos no sistema pelas interações entre as malhas de controle, é prática comum a desintonização de alguns controladores para tornar o sistema mais conservativo por meio da redução dos ganhos e, conseqüentemente, da dinâmica do sistema realimentado. Um procedimento freqüentemente adotado na sintonia de controladores em um sistema de controle multimalha consiste em determinar os ajustes satisfatórios de cada malha de maneira individual, com as demais desativadas. Quando da ativação de todas as malhas, a sintonia deve ser refeita se houver interações indesejáveis entre malhas, geralmente deixando os controladores mais conservativos. Outra proposta consiste em privilegiar a sintonia da malha mais importante do processo em detrimento das demais. Neste caso, o controlador da variável de processo mais importante seria sintonizado enquanto as demais malhas permaneceriam desativadas. A seguir, mantendo a malha mais importante em funcionamento, os demais controladores são sintonizados em ordem de importância de cada variável, assegurando que o ganho do controlador menos importante seja baixo o suficiente para não afetar as demais malhas.

3.2 Controlador PID

Embora existam vários tipos, o controlador PID (proporcional-integral-derivativo) é o mais utilizado para o controle de processos. Isto se deve ao seu bom desempenho em uma ampla faixa de condições de operação e à sua simplicidade funcional, que permite operá-lo de um modo simples e direto. A estrutura de um controlador PID é dada por três ações de controle distintas (proporcional, integral e derivativo) conforme a equação 3:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad [\text{Eq. 3}]$$

A sintonia de um controlador PID consiste em ponderar estas ações de controle de modo a atender as especificações de desempenho (OGATA, 2000), o que requer a devida compreensão dos efeitos que cada ação de controle provoca no sistema de malha fechada:

- Além de melhorar a rejeição dos distúrbios, o aumento na ação de controle proporcional (aumento do parâmetro K_p) implica na redução da constante de tempo do sistema realimentado e, conseqüentemente, no aumento da velocidade de resposta. Entretanto, caso a planta não possua um integrador, a utilização de uma ação de controle proporcional pura sempre implica em um erro estacionário na saída do processo.
- A ação de controle integral (ajuste da constante de tempo τ_i) permite posicionar os pólos de malha fechada e, conseqüentemente, da resposta dinâmica do sistema realimentado, e, independente do processo, elimina tanto o erro em regime permanente como os efeitos do distúrbio. Entretanto, este aumento da ação de controle pode implicar sobre-sinais e instabilidades na malha de controle.

- A ação derivativa tem um caráter antecipativo, uma vez que atua sobre o erro antes que este se torne demasiadamente grande, tendendo a melhorar o desempenho do sistema quando utilizada em conjunto com outras ações de controle. Esta ação de controle permite ajustar o amortecimento do sistema realimentado pela seleção da constante de tempo τ_d , determinando o tipo de resposta transitória do sistema. Entretanto, ela não contribui com a redução do erro em regime permanente e nem com a rejeição do distúrbio.

Vários tipos de regras têm sido propostos para a sintonia de um controlador PID, o que tem tornado possível o ajuste suave e preciso desses controladores (OGATA, 2000). Neste trabalho, os parâmetros que ponderam as ações de controle do PID foram ajustados por tentativa e erro até que o sistema atinja um desempenho satisfatório.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Ambiente Analisado

A avaliação do desempenho do sistema é feita considerando-se uma sala de escritório, de 12 m² e pé direito de 2,7 m, com uma porta e duas janelas. Considera-se que esta sala possua dois computadores, totalizando 350 W de potência dissipada e uma lâmpada incandescente de 100 W. Como perfil de ocupação considera-se três pessoas na sala das 8 às 18 horas.

As propriedades termofísicas dos elementos de fechamento são apresentadas na Tabela 1, onde c (J/(kg.°C)) é o calor específico, ρ (kg/m³) é a densidade, k (W/(m.°C)) é a condutividade térmica dos mesmos, α é a absorvância e ϵ é a emissividade das superfícies dos elementos. Como dados climáticos utiliza-se dados de um dia típico de verão, correspondente à região da cidade de São Paulo, Figura 4.

Tabela 1 - Propriedades termofísicas dos elementos de fechamento (T = 300 K).

MATERIAIS E/OU ELEMENTOS	(ρ) Kg/m ³	(c) J / (kg °C)	(k) W/(m °C)	(ϵ)	(α)
Tijolo Cerâmico	2000	650	0,96	0,90	0,63
Madeira	640	2000	0,15	0,90	0,65
Vidro 3 mm	2700	837	1,4	0,25	0,05

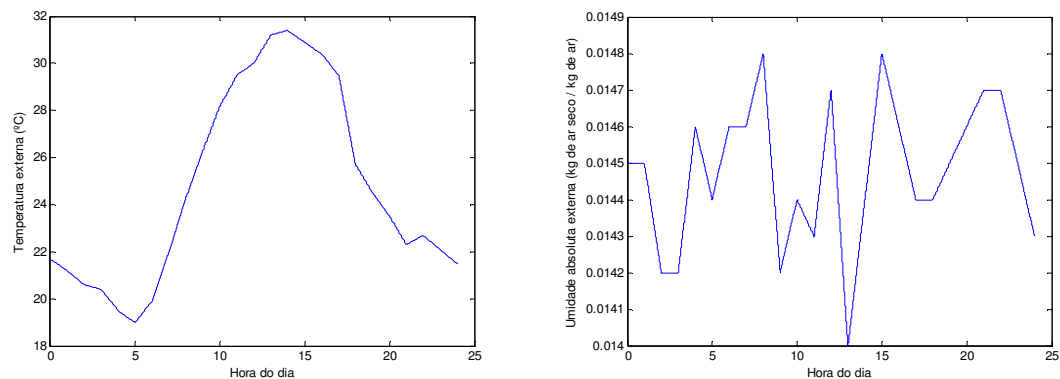


Figura 4 – Temperatura e umidade externa para um dia típico de verão na cidade de São Paulo

Os controladores PID para temperatura e umidade foram sintonizados de forma independente utilizando o método de tentativa e erro. Iniciando com o ajuste $K_p = 1$, $K_i = 1$, $K_d = 0$, varia-se o ganho integral do controlador de temperatura até que a resposta do sistema seja satisfatória. Neste ponto, o

valor de K_i é fixado e o ganho proporcional é variado com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema, sendo que o ganho derivativo K_d foi mantido nulo durante todo este procedimento. Com o controlador de temperatura previamente sintonizado, o mesmo procedimento é aplicado para sintonizar do controlador de umidade. Neste contexto, foram obtidos os seguintes ganhos para os controladores PID do sistema:

- Controlador da Temperatura: $K_p = 1$, $K_i = 0,1$, $K_d = 0$
- Controlador da Umidade: $K_p = 10$, $K_i = 0,001$, $K_d = 0$

4.2. Simulação numérica e resultados

Para a realização da simulação do modelo matemático utiliza-se a ferramenta computacional *MATLAB/Simulink*. Na Figura 5 mostra-se um diagrama em blocos para a simulação no *Simulink* do sistema proposto. A atuação dos controladores é analisada considerando as condições de conforto humano, pré-estabelecidas (NBR 6410:1980): temperatura interna de 24°C e umidade relativa de 50% (umidade absoluta interna de 0,0105 kg/kg). Inclui-se o ruído gerado pelos sensores de temperatura e umidade na simulação. Considera-se ainda que as fontes de calor, no interior da sala, foram ligadas e/ou portas e janelas foram abertas ao meio dia, simulando a ocorrência de uma perturbação no sistema. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 6, 7 e 8.

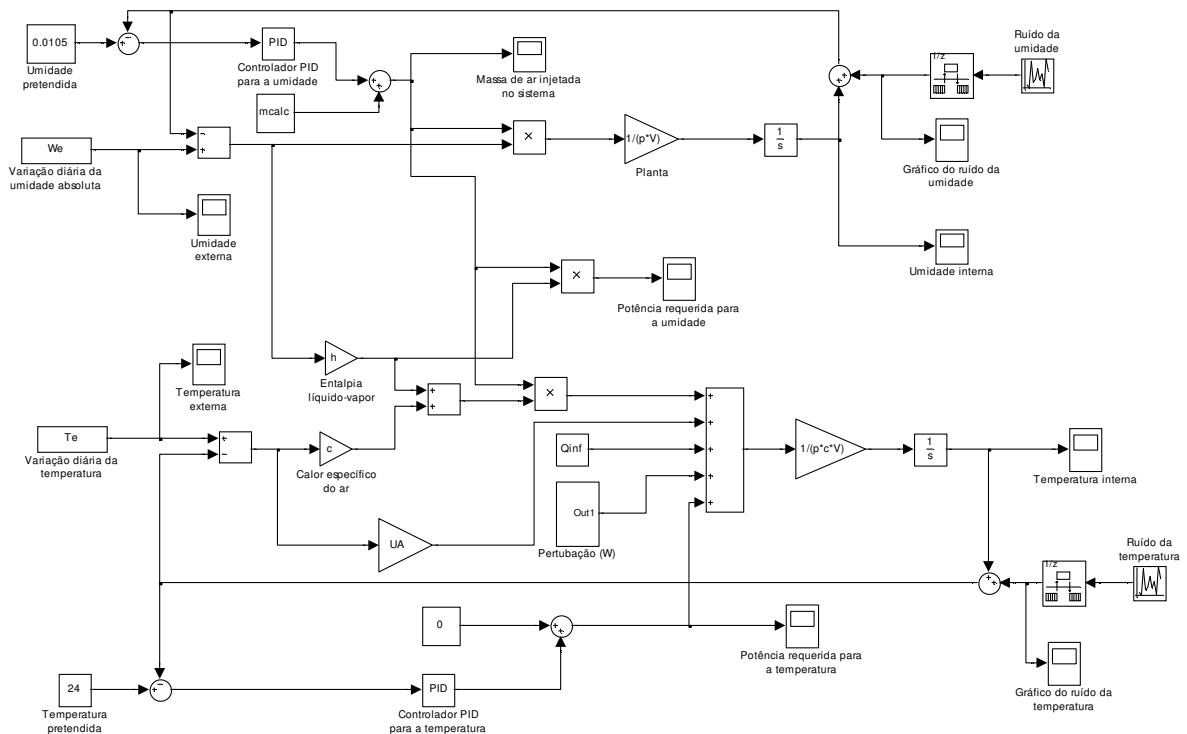


Figura 5 – Diagrama em blocos do sistema a ser controlado.

Na Figura 6 mostra-se o comportamento do sistema para as condições estabelecidas anteriormente sem a atuação dos controladores. No horário de pico (em torno de 14 horas) cuja temperatura externa é máxima, a temperatura interna da sala foi de aproximadamente 31,5°C, um valor elevado para uma sala de trabalho. Além do mais, a umidade interna ficou em 38% maior que o valor desejado, ou seja, o ambiente ficou muito mais seco. Desta forma, observa-se que, sem um controle adequado, a temperatura e umidade da sala não atingem os valores desejados para se obter as condições desejadas de conforto.

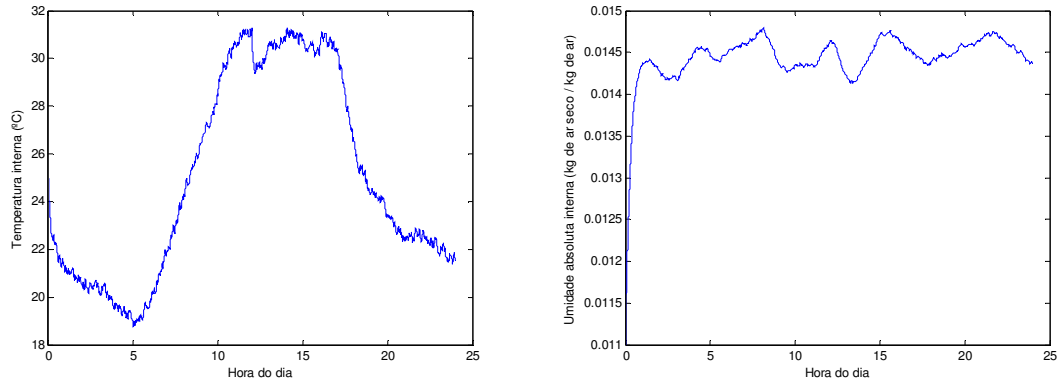


Figura 6 – Temperatura e umidade interna sem controle PID

Na Figura 7 apresenta-se o comportamento do sistema com a atuação do sistema de controle multimalha proposto nas mesmas condições. Com uma hora de operação, a temperatura da sala alcança o valor desejado, cerca de 24°C. A umidade interna demora um tempo maior (em torno de seis horas) para estabilizar no valor de referência desejado. Embora pareça tempo demasiado, este fato pode ser considerado normal uma vez que os sistemas térmicos são naturalmente lentos. Mesmo com o ruído gerado pelos sensores e a ocorrência de uma perturbação, observa-se que o sistema de controle proposto mostrou-se robusto, apresentando um desempenho satisfatório controlando adequadamente tanto a temperatura quanto a umidade do ar de forma a assegurar as condições desejadas de conforto humano (KASAHARA *et al*, 1999). Na Figura 8 apresenta-se a demanda de potência requerida, pelo equipamento de condicionamento de ar, para se efetuar o controle de temperatura e umidade do ambiente construído. Observa-se que o controle da temperatura exigiu-se maior potência do equipamento.

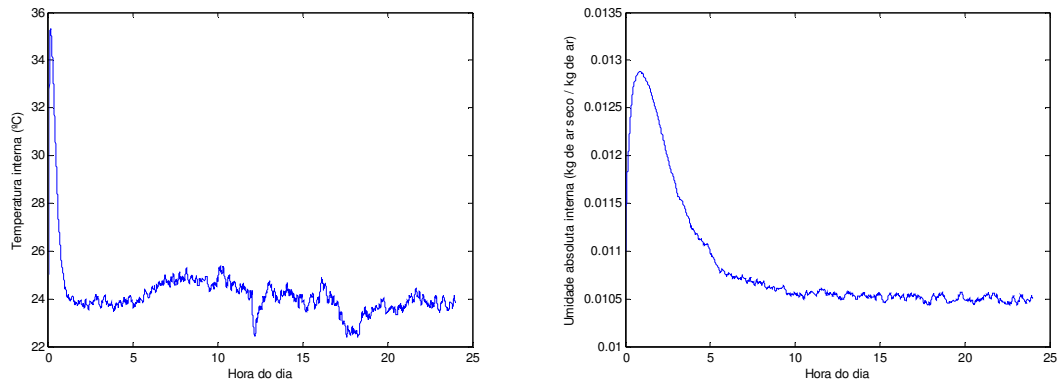


Figura 7 – Temperatura e umidade interna com controle PID

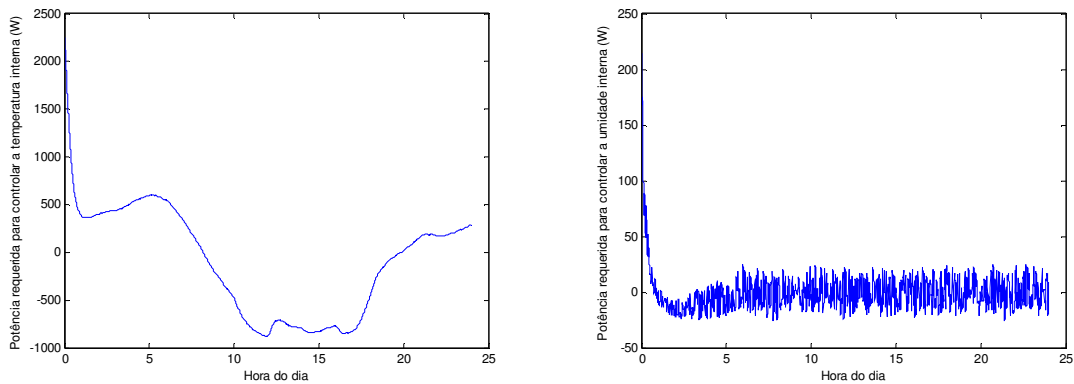


Figura 8 – Potência requerida para controlar a temperatura e umidade interna

5. CONCLUSÕES

Neste artigo demonstra-se a importância do uso de sistemas de controle para um condicionamento eficiente de um ambiente construído. Analisa-se o desempenho de controladores PID para manutenção da temperatura e umidade interna, em um ambiente construído, considerando-se uma faixa de conforto. Um sistema de controle multimalha, utilizando controladores PID, é proposto para o ajuste da temperatura e umidade do ambiente. A partir de simulações numéricas, observa-se que o sistema de controle proposto apresenta desempenho satisfatório e robusto, uma vez que as variáveis desejadas foram adequadamente controladas sob as condições de simulação estabelecidas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKUTSU, M (1998) “Método para a avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil”. 1998. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Programa de Pós Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980) “Instalações centrais de ar condicionado para conforto – parâmetros básicos de projeto” NBR 6401:1980. Rio de Janeiro: ABNT, 17 p.
- DEXTER, A. L.; GENG, G.; HAVES, P. (1990) “The application of self-tuning PID control to HVAC systems”. In: IECColloquium on Control Building Energy Management Systems. 30 May, v.1. p. 4/1- 4/3.
- GUANG, G.; GEARY, G. M. (1993) “On performance and tuning of PID controllers in HVAC Systems”. In: Second IEEE Conference on Control Applications. V. 2, p. 819-824.
- KASAHARA, M. et al. (1999). “Design and tuning of robust PID controller for HVAC systems”. ASHRAE Annual Meeting, Seattle, WA(US).
- OGATA, Katsuhiko (2003) “Engenharia de Controle Moderno”. Prentice-Hall. 4ª edição, 2003.
- PINTO, M. A. V.; SOUZA, H. A.; FREITAS, M. S. R.(2001) “Desempenho térmico dos painéis de vedação versus conforto térmico”. Revista Construção Metálica, São Paulo, v. 11, n. 50, p. 34-38, set./out. 2001.
- RAHMATI, A.; RASHIDI, F.; RASHIDI, M. (2003) “A hybrid fuzzy logic and PID controller for control of nonlinear HVAC systems”. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. V. 3, 5-8 Oct. p. 2249-2254.

- SEBORG, D.E., EDGAR, T.F., MELLICHAMP, D.A.(1989) "Process Dynamics and Control". 1ª edição, John Wiley, New York, 1989.
- SOUZA, H. A.; FRANSOZO, H.L.; BRAGA, G. A.; FERNANDES, W. L. (2003) "Avaliação do desempenho térmico dos sistemas de fechamento pré-fabricados utilizados na construção estruturada em aço". In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2003, Curitiba. Anais... Curitiba: ENCAC-COTEDI, 2003. p. 1236-1244.
- TRIBESS, A.; HERNANDEZ NETO, A.; VITTORINO, F.; PEÇANHA, M.(1997) "Aspectos de conservação de energia em ambientes condicionados." In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 1997, Salvador. Anais... Salvador: ENCAC-COTEDI, 1997. p. 413-417.