

CONTROLE HÍBRIDO DE UMIDADE EM UM TÚNEL PSICROMÉTRICO

José Antônio Riul

Universidade Federal da Paraíba - DTM-CT–UFPB–João Pessoa, e-mail: riul@ct.ufpb.br

Paulo Henrique de Miranda Montenegro

Universidade Federal da Paraíba – Pós-Graduação em Eng. Mecânica-CT–UFPB–João Pessoa, e-mail: phmontenegro@bol.com.br

José Maurício de Matos Gurgel

Universidade Federal da Paraíba - DTM-CT–UFPB–João Pessoa, e-mail: gurgel@les.ufpb.br

Benedito Santana de Oliveira

Universidade Federal da Paraíba - DTM-CT–UFPB–João Pessoa, e-mail: bene@ct.ufpb.br

Resumo. *O objetivo do presente trabalho é o projeto de um controlador híbrido de umidade para sistemas de refrigeração por absorção. Estes sistemas de refrigeração trabalham de forma diferente dos convencionais na obtenção do frio, aproveitando-se de uma fonte de calor como alimentação. Esta fonte de calor é o ar aquecido proveniente da combustão do gás natural e deve ser resfriado e mantido com umidade relativa desejável, antes do seu aproveitamento no sistema de refrigeração. Um túnel psicrométrico composto de um sistema de ventilação e de um sistema de refrigeração, é utilizado como protótipo para realização do controle de umidade. Um conjunto de resistências elétricas, simulam um queimador de gás natural, gerando a fonte de calor e a umidade da mistura (ar da combustão e ar ambiente) é medida através de um sensor de umidade. A estratégia de controle proposta é realizada em duas etapas, utilizando-se redes neurais multicamadas e um controlador proporcional. Resultados de simulação são mostrados para avaliação do desempenho do sistema de controle proposto.*

Palavras-chave: *Refrigeração de Ar, Controle*

1. INTRODUÇÃO

O objetivo do presente trabalho é o projeto de um controlador híbrido (neural e convencional) de umidade para sistemas de refrigeração por absorção. Estes sistemas de refrigeração trabalham de forma diferente dos convencionais na obtenção do frio, aproveitando-se de uma fonte de calor como alimentação. Esta fonte de calor é o ar aquecido proveniente da combustão do gás natural e deve ser resfriado e mantido com umidade relativa desejável, antes do seu aproveitamento no sistema de refrigeração. Um túnel psicrométrico composto de um sistema de ventilação e de um sistema de refrigeração, é utilizado como protótipo para realização do controle de umidade. No sistema de ventilação, a turbina com velocidade variável é usada para fornecer um fluxo de ar com temperatura inferior a do ar proveniente da combustão do gás, objetivando alcançar a umidade relativa desejável

para o processo de refrigeração. As resistências elétricas, simulam um queimador de gás natural, gerando a fonte de calor e a umidade da mistura (ar da combustão e ar ambiente) é medida através de um sensor de umidade, fixado no túnel. O controlador é projetado em função de um modelo identificado do sistema (Riul et al., 2003). A estratégia de controle proposta é realizada em duas etapas, utilizando-se redes neurais multi-camadas e um controlador proporcional (Riul et al., 2000). Na primeira, uma rede neural multi-camadas (Haykin, 1994; Beale et al., 1991) é treinada “off line” tendo como entradas a umidade relativa de referência no instante de tempo $K+1$, a umidade relativa de referência no instante de tempo K , a umidade relativa de referência no instante de tempo $K-1$, especificadas para a planta, e como saída a variável de controle da planta. O controlador neural adaptativo direto tem seus pesos ajustados pelo algoritmo de propagação retroativa do erro entre a umidade relativa de referência e a obtida no ambiente que está sendo controlado, através da minimização de um índice de desempenho. Na segunda etapa, o controle do sistema é realizado “on line” de forma híbrida, considerando a ação de um controlador proporcional e a ação do controlador neural adaptativo direto, com seus pesos sendo ajustados a partir dos valores determinados na primeira etapa. Para avaliação do desempenho do sistema de controle projetado, resultados de simulação são mostrados.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O túnel psicrométrico é composto de um sistema de ventilação e de um sistema de refrigeração, conforme mostrado na Figura (1), é utilizado como protótipo para realização do controle de umidade. No sistema de ventilação, a turbina com velocidade variável é usada para fornecer um fluxo de ar com temperatura inferior a do ar proveniente da combustão do gás objetivando alcançar a umidade desejável para o processo de refrigeração. As resistências elétricas simulam um queimador de gás natural gerando a fonte de calor, e a umidade da mistura (ar da combustão e ar ambiente) é medida através de um sensor de umidade fixado no túnel. Um computador PC pentium-200 mmx com 32 mb de memória RAM, uma placa de entrada e saída de dados, marca QUATECH, modelo DAQ-801 e o programa computacional LABVIEW são utilizados para coletar a umidade, processar os dados, calcular a variável de controle e enviar a mesma para a turbina.



Figura 1. Túnel Psicrométrico

Neste trabalho, será utilizado para o projeto do controlador, o modelo matemático do sistema obtido através do estimador recursivo dos mínimos quadrados (RMQ), mostrado na forma de espaço de estado pela Eq. (1) e pela Eq. (2), obtidas a partir de dados coletados diretamente do sistema. Na obtenção dos dados para identificação, a turbina foi excitada em malha aberta por uma função degrau e a resposta do sistema que é a umidade do ar foi captada pelo sensor de umidade, usando-se tempo de amostragem de um segundo.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.24 & -0.082 & -0,0034 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,0014 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. CONTROLADOR NEURAL ADAPTATIVO DIRETO E HÍBRIDO

A Figura (2) mostra um esboço do controlador neural adaptativo direto (Cavalcanti, 1994; Miller III et al., 1995; Nascimento & Yoneyama, 2000) e da planta. O controlador é treinado “off line” para que a saída $y(K+1)$ da planta siga a referência $y_r(K+1)$. Isto é obtido pela minimização do índice de desempenho I'_w dado pela Eq. (3). A minimização é realizada como segue: primeiro, o alvo da rede é determinado usando-se o algoritmo de propagação retroativa do erro (APR) de forma a minimizar o índice de desempenho I_u dado pela Eq. (4). Definindo-se como u_r o valor de saída da rede, então o valor de entrada da planta u_p é obtido pela Eq. (5), que é o resultado da minimização do índice de desempenho I_u . Dessa forma, o alvo da rede u_p depende do erro entre y_r e y , do Jacobiano da planta e do fator de adaptação η . O Jacobiano é calculado impondo-se uma sequência de entrada $u(K)$ e determinando-se a sequência de saída $y(K)$ da planta; e através dessas duas sequências a curva $y(u)$ é obtida e consequentemente sua derivada. E, na sequência, os pesos de entrada $W_e(K+1)$ e de saída $W_s(K+1)$ da rede neural são ajustados utilizando-se o APR, para obtenção do sinal de controle $u(K+1)$ com a minimização do índice de desempenho I_w dado pela Eq. (6).

$$I'_w(K) = \frac{1}{2} [\text{erroy}(K)]^2 \quad (3)$$

onde: $\text{erroy}(K) = y_r(K) - y(K)$

$$I_u(K) = \frac{1}{2} [\text{erroy}(K)]^2 \quad (4)$$

$$u(K+1) = u(K) - \eta \nabla I_u(K) \quad (5)$$

onde: $\nabla I_u = -\text{erroy} \cdot \frac{\partial y(K)}{\partial u(K)}$

$u(K+1) = u_p$ e $u(K) = u_r$.

$$I_w(K) = \frac{1}{2} [u(K+1) - u(K)]^2 \quad (6)$$

O ajuste dos pesos da rede é obtido conforme Eq. (7) e Eq. (8).

$$W_s(K+1) = W_s(K) - \mu \nabla I_{w_s}(K) \quad (7)$$

$$W_e(K+1) = W_e(K) - \mu \nabla I_{w_e}(K) \quad (8)$$

onde: μ - Fator de treinamento

∇I - Gradiente do Índice de Desempenho

A rede neural, usada para o controlador adaptativo direto (CNAD), é composta por uma camada de entrada com função de ativação linear (L), uma intermediária com função de ativação tangente hiperbólica (tgh) e a de saída com função linear (L). A camada de entrada da rede tem tres neurônios e as entradas são: a umidade relativa de referência $yr(K+1)$, e os valores $yr(K)$ e $yr(K-1)$ que correspondem a atrasos da umidade relativa de referência. A camada intermediária contém nove neurônios e a de saída um, que é a variável de controle da planta $u(K+1)$.

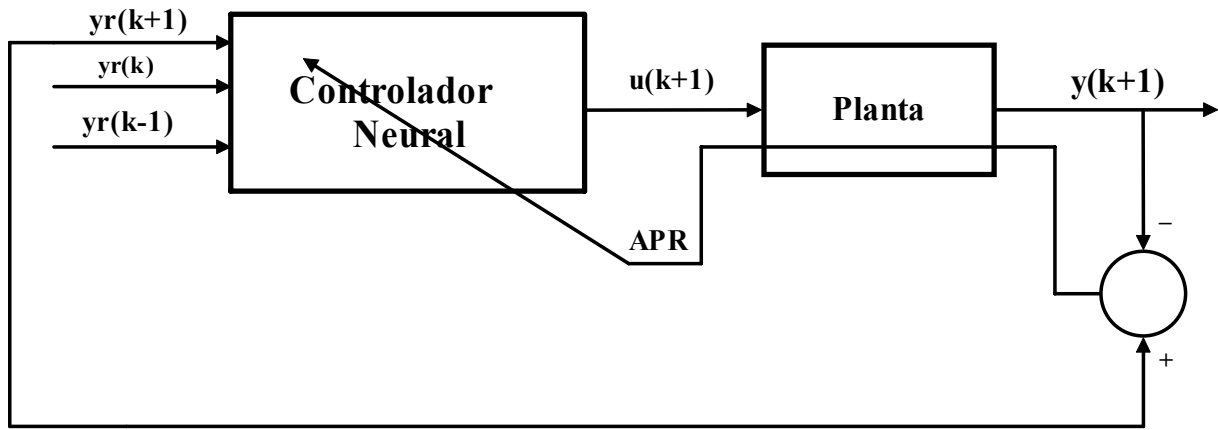


Figura 2. Rede do Controlador Neural Adaptativo Direto e Planta.

A fase de controle “on line”, é realizada pelo controlador híbrido mostrado na Fig. (3), que é o resultado da ação do controlador neural adaptativo direto e do controlador convencional proporcional com ganho $k_p = 2.9$. O controlador neural adaptativo direto usa os parâmetros da rede neural treinados “off line”, e, estes parâmetros continuam sendo ajustados, sendo o alvo da rede determinado através da Eq. (5). Conforme mostrado na Fig. (3), a variável de controle total é dada pela Eq. (9) e a proporcional pela Eq. (10).

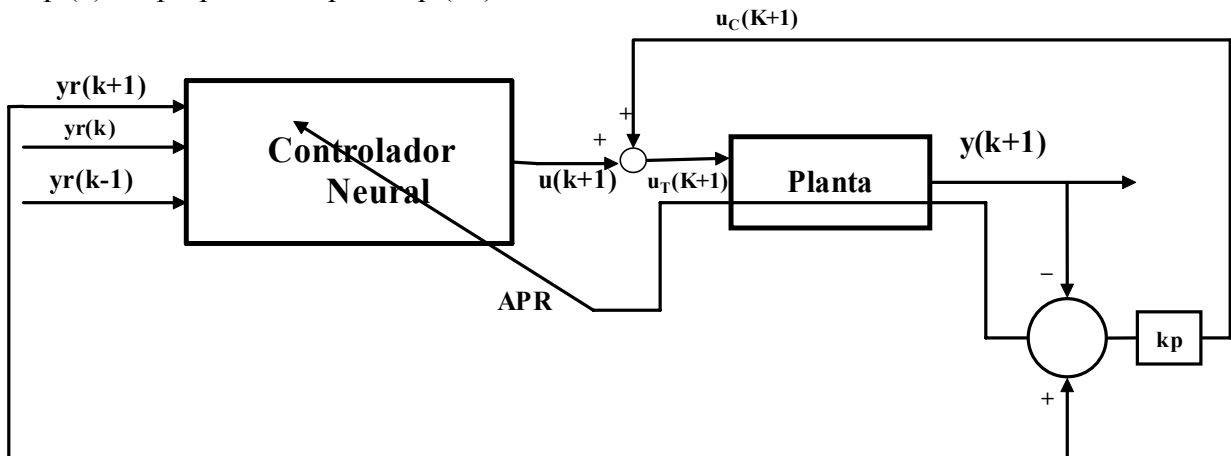


Figura 3. Controlador Híbrido e Planta

$$u_T(K+1) = u(K+1) + u_C(K+1) \quad (9)$$

$$u_C(K+1) = k_p \cdot \text{erroy}(k+1) \quad (10)$$

4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Para a fase de treinamento do controlador neural, utilizou-se como sinal de referência um degrau de 21 % de umidade relativa. O treinamento foi concluído com 10 iterações, e o índice de desempenho mínimo obtido foi de $I_W = 7.7e^{-5} (\%)^2$, com um fator de treinamento da rede $\mu = 0,05$, um fator de adaptação $\eta = 0.1$ e o jacobiano da planta $J = 0.4 \text{ \%}/V$. A Figura (4) mostra a curva do índice desempenho em função do número de iterações, sendo o valo inicial igual $2.5 e^{-3} (\%)^2$.

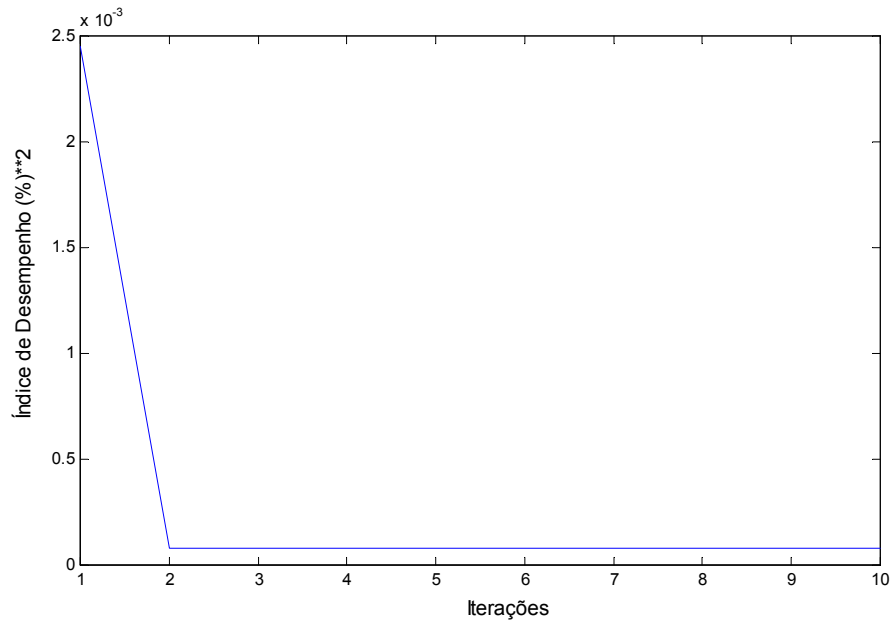


Figura 4. Índice de Desempenho do Sistema

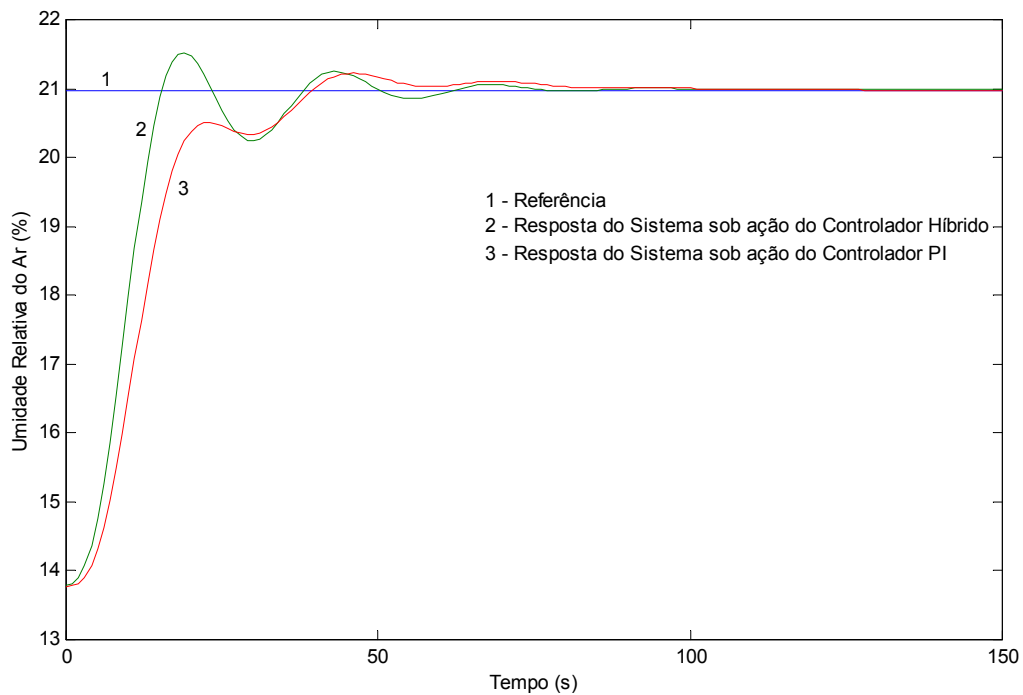


Figura 5. Respostas do Sistema às Referências Degrau , sob ação do Controladores Híbrido e Convencional

O desempenho do sistema sob ação dos controladores proporcional-integral (PI) e híbrido, é mostrado na Fig. (5). Na curva 2, mostra-se a umidade relativa obtida para o sistema, sob ação do controlador híbrido. Observa-se que em 10 s, a umidade do ambiente atinge o valor de referência, e após 100s o ambiente com um pequeno erro em regime permanente, porém estável. Na curva 3, mostra-se a umidade do sistema sob ação do controlador PI com ganhos $k_p = 3,5$ e $k_i = 0,2$, projetado utilizando a técnica de Zigler – Nichols (Ogata, 2000; Bolton, 1995). Observa-se que em 40 s, a umidade do ambiente atinge o valor de referência, e após 100s o ambiente permanece com umidade estável com erro permanente menor do que quando usado o controlador híbrido.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho projetou-se um controlador híbrido de umidade para sistemas de refrigeração por absorção, utilizando-se um túnel psicrométrico. O equipamento é composto de um sistema de ventilação e de um sistema de refrigeração, e é utilizado como protótipo para realização do controle de umidade. O projeto foi realizado em duas etapas; a primeira, para treinamento de um controlador neural adaptativo direto e a segunda, para efetuar o controle de umidade do sistema através do controlador híbrido. Foram realizadas simulações usando o controlador híbrido e um controlador proporcional-integral, para uma referência tipo degrau. Dos resultados obtidos verificou-se que o sistema, sob ação do controlador híbrido, atinge a umidade desejada em 10 s, enquanto que com o controlador PI, esta é atingida com 50 s. No entanto, com a utilização do controlador PI, as oscilações que ocorrem têm menor amplitude. Pesquisas futuras serão desenvolvidas com o intuito de implementar o controlador híbrido experimentalmente.

6. REFERÊNCIAS

- Beale, R. & Jackson, T., 1991, “Neural Computing: An Introduction”, Editora Adam Hilger, New York.
- Cavalcanti, J. H. F., 1994, “Controladores Neurais Adaptativos”, Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- Bolton, W., 1995, “Engenharia de Controle Moderno”, Makron Books do Brasil Editora Ltda, São Paulo - SP.
- Haykin, S., 1994, “Neural Networks – A Comprehensive Foundation”, Macmillan, New York.
- Miller III, W. T. & Sutton, R. S. & Werbos, P. J., 1995, “Neural Networks for Control”, The MIT Press, London.
- Nascimento Júnior, C. L. & Yoneyama, T., 2000, “Inteligência Artificial em Controle e Automação”, Editora Edgard Blucher Ltda, primeira edição.
- Ogata, K., 2000, “Engenharia de Controle Moderno”, Editora Prentice/Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro - RJ.
- Riul, J. A., Silva, J. F., Cavalcanti, J. H. F., 2000, “Controlador Híbrido Aplicado a um Atuador Hidráulico”, I Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brasil.
- Riul, J. A., Montenegro, P. H. M., Braga, A. H. G., Silva, S. A., 2003, “Modelagem de um Sistema de Resfriamento de Ar”, XXIV Iberian Latin-Americam Congress on Computation Methods in Engineering, MG, Brasil.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso neste trabalho.

HUMIDITY HIBRID CONTROL IN A PSYCHROMETRIC TUNNEL

José Antônio Riul

Universidade Federal da Paraíba - DTM-CT-UFPB-João Pessoa, e-mail: riul@ct.ufpb.br

Paulo Henrique de Miranda Montenegro

Universidade Federal da Paraíba – Pós-Graduação em Eng. Mecânica-CT–UFPB–João Pessoa, e-mail: phmontenegro@bol.com.br

José Maurício de Matos Gurgel

Universidade Federal da Paraíba - DTM-CT–UFPB–João Pessoa, e-mail: gurgel@les.ufpb.br

Benedito Santana de Oliveira

Universidade Federal da Paraíba - DTM-CT–UFPB–João Pessoa, e-mail: bene@ct.ufpb.br

Abstract. *The aim of this paper is to present a project of a humidity hybrid control for absorption cooling systems. These cooling systems work in a different way from the conventional ones to attain the necessary cold temperature as it uses a source of heat as a feeding unit. This source of heat is the heated air provided by the combustion of natural gas, and it must be cooled and kept at a desired relative humidity before it is used in the cooling system. A psychrometric tunnel, made of a ventilation system and a cooling system, is used as a prototype to the accomplishment of the humidity control. A set of electrical resistors simulate a natural gas burner producing a source of heat, and the humidity of mixture (combustion air and room air) is measured by a humidity sensor. The proposed control strategy is accomplished in two stages: the use of multi-layer neural nets and the use of a proportional controller. Simulation results are shown in order to appraise the performance of the proposed control system.*

Key-words. *Air cooling, Control.*