

IDENTIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO HÍBRIDO COM FOCO NO PROCESSO EVAPORATIVO

PEDRO IVO E. VIANNA¹ E ADOLFO BAUCHPIESS¹

1. *Laboratório de Automação e Robótica, Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Caixa Postal 04386, 70904-970 Brasília-DF
E-mails: pedroiavianna@gmail.com, adolfoobs@unb.br*

Abstract— The hybrid HVAC system developed at the Automation and Robotics Laboratory of University of Brasília aims to provide an alternative to conventional air conditioners, which consume a lot of energy. This paper proposes the identification of the dynamic environment in which this system operates, focusing on the aspect of the evaporative process. Obtaining a satisfactory mathematical model will enable the design of controllers that provide thermal comfort with maximum energy savings. It is proposed the grey box type identification that considers prior knowledge of the environment. A first principles structured model is developed to do the grey box identification. This model has physical meaning and its parameters are associated with the built environment, which may indicate the need to adapt its architecture. The structured model proved being satisfactory to represent the dynamics of humidity and temperature of the environment, considering the cost function adopted (least squares).

Keywords— Identification of dynamical systems, hybrid HVAC system, grey box, first principles.

Resumo— O sistema de climatização híbrido desenvolvido no Laboratório de Automação e Robótica da Universidade de Brasília tem como objetivo fornecer uma alternativa aos aparelhos de ar condicionado convencionais, que consomem muita energia. Este trabalho propõe a identificação dinâmica do ambiente no qual atua este sistema, com foco no aspecto evaporativo do processo. A obtenção de um modelo matemático satisfatório possibilitará o projeto de controladores que forneçam conforto térmico com o máximo de economia de energia. É proposta a identificação do tipo caixa cinza, que considera conhecimentos prévios do ambiente. Um modelo estruturado por princípios fundamentais é desenvolvido para a identificação caixa cinza. Este modelo possui significado físico e seus parâmetros estão associados à construção do ambiente, podendo indicar a necessidade de adequação na arquitetura do mesmo. O modelo estruturado se mostrou satisfatório para representar a dinâmica da umidade e da temperatura do ambiente, considerando a função de custo adotada (mínimos quadrados).

Palavras-chave— Identificação de sistemas dinâmicos, sistema de climatização híbrido, caixa cinza, princípios fundamentais.

1 Introdução

A demanda por energia elétrica é crescente bem como a preocupação sobre o futuro do planeta e formas de se conseguir desenvolvimento sustentável. No Brasil, boa parte da energia consumida por ambientes residenciais e comerciais destina-se ao uso de equipamentos de ar-condicionado. Para suprir a demanda por energia elétrica têm-se aumentando a geração de energia elétrica (com certo impacto ambiental).

Uma forma alternativa e ambientalmente mais correta é fazer com que essa demanda energética diminua ou cresça mais lentamente através de medidas que aumentem a eficiência energética. Neste contexto o desenvolvimento de ambientes inteligentes procura, entre outros aspectos, proporcionar conforto térmico com o máximo de economia de energia.

Ambientes prediais normalmente são muito complexos, porém com o avanço da tecnologia e das técnicas de automação e controle, tem-se desenvolvido redes de sensores e protocolos de comunicação que permitem a criação desses ambientes.

Um ambiente inteligente faz uso da rede de sensores e atuadores para prover serviços aos usuários, dentre os quais o conforto térmico de seus ocupantes considerando o uso racional da energia. Inserido neste escopo a sala de reuniões do Laboratório de Automação e Robótica (LARA) da Universidade de

Brasília (UnB), foi o objeto de estudo neste trabalho. Nesta sala foi instalado um equipamento de climatização híbrido (Figura 1), que funciona nos modos evaporativo e convencional, Olmos (2009).

O sistema evaporativo aumenta a umidade da sala, que terá sua temperatura diminuída pelo fato da água retirar o calor do ar ao evaporar. Desta forma, para que se obtenha um menor consumo de energia o sistema evaporativo deverá ter preferência no uso em relação ao sistema convencional, que consome muito mais energia, mantendo o compromisso de garantir o conforto térmico aos seus ocupantes.

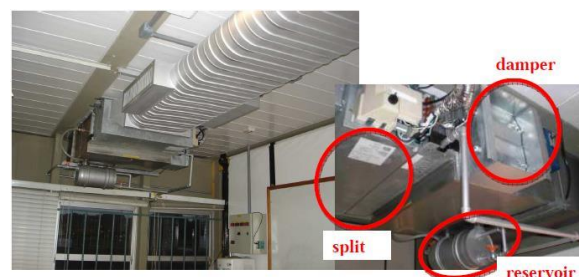


Figura 1. Equipamento de climatização híbrido.

Naturalmente a eficiência do processo evaporativo é tanto maior quanto menor a umidade relativa do ar externo. O que se verifica em grande parte do ano, em certas regiões do país, como no centro-oeste.

Através da técnica de identificação de sistemas dinâmicos do tipo caixa cinza, procura-se um modelo

matemático da umidade e da temperatura da sala de reuniões em função dos sinais que influenciam a dinâmica deste ambiente, sendo temperatura (do ambiente externo, vizinho e do ramo do ar condicionado) e umidade relativa (do ambiente externo, vizinho e do ramo do umidificador). Nesse tipo de identificação é possível que informação a priori esteja disponível na forma da estrutura do modelo e que os seus parâmetros sejam estimados a partir de dados dinâmicos (Aguirre, 2007). Neste projeto a estruturação do modelo se dá por princípios fundamentais, que possui significado físico e utiliza-se de um conhecimento do sistema. O modelo estruturado por princípios fundamentais não se limita a fazer uma análise de pequenos sinais em torno do ponto de operação, a proposta é de que se obtenha um modelo de grandes sinais que permita grandes variações das variáveis (condição necessária à operação do sistema híbrido, em que se exploram grandes variações da umidade relativa). Depois de obtido o modelo estruturado, dados dinâmicos de entrada e saída são utilizados para estimar seus parâmetros.

O objetivo deste trabalho é fazer a identificação de um ambiente térmico no qual está instalado um equipamento de ar-condicionado híbrido, com foco no processo evaporativo. O propósito do modelo é projetar controladores que forneçam conforto térmico e minimização do consumo de energia. Um índice PMV (Predicted Mean Vote. Segundo a norma de conforto térmico ISO 7730) entre $\pm 0,5$ leva, em média, a apenas 10% de usuários insatisfeitos com as condições térmicas, e é nosso objetivo de conforto térmico.

2 Modelos Dinâmicos

2.1 Modelo estruturado por princípios fundamentais

Para a realização de uma identificação caixa cinza é necessário ter algum conhecimento sobre o sistema real. Apesar de um ambiente térmico apresentar parâmetros distribuídos e não-linearidades, será considerado um modelo a parâmetros concentrados, contínuo, invariante no tempo e linear, que apresente precisão suficiente para descrever o ambiente real. Bauchspiess et al. (2006) propõe um modelo estruturado por princípios fundamentais para a temperatura de ambientes prediais. A ideia básica é fazer a adição de todos os fluxos de calor no ambiente em estudo.

Para se considerar os fluxos de calor que tem influência sobre o ambiente de estudo, proveniente da transferência de calor dos ambientes vizinhos, é necessário se investigar a parede. Entre os modelos analisados por Fraisse (2002), o modelo 2R1C considerada uma capacitância térmica interna e duas resistências térmicas de condutividade (Figura 2), onde o fluxo de calor entre dois ambientes depende da diferença de temperatura entre T_o e T_{iv} , sendo T_{iv} um ponto fictício no meio da parede. A transferência de calor entre o ambiente e uma sala vizinha pode ser

representada por uma função de transferência de primeira ordem, sendo RC_v a constante de tempo.

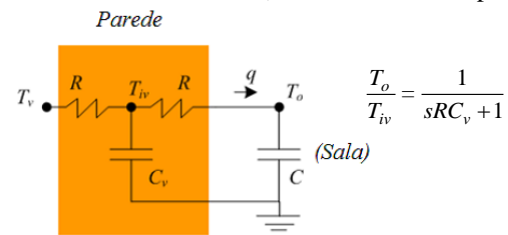


Figura 2. Modelo análogo à transferência de calor entre ambientes.

O processo de resfriamento do ar pelo ar condicionado também será modelado como uma função de transferência de primeira ordem. O modelo de temperatura da figura 6 representa a dinâmica da sala.

O volume de ar na sala é modelado como uma capacitância térmica concentrada C , onde a temperatura interna estimada pelo modelo é T_o (Bauchspiess et al., 2006). Podemos observar pelo modelo que essa temperatura estimada é o resultado da integração de parcelas de fluxo de calor (q_e , q_v e q_c), assim um fluxo positivo para a sala aumenta sua temperatura, enquanto um fluxo negativo acarreta na diminuição da temperatura.

2.2 Ar Condicionado Híbrido

Como o foco deste projeto é o sistema evaporativo, devemos trabalhar com um modelo estruturado de maneira semelhante que seja capaz de representar a dinâmica da umidade na sala.

Um dos problemas ao se trabalhar com a umidade relativa é que esta é uma variável que está acoplada a temperatura. Uma variação na temperatura provoca uma variação na umidade relativa, sem que haja qualquer mudança na quantidade de vapor d'água no ambiente. Para contornar este problema usaremos como variável a umidade absoluta, já que esta é ortogonal à temperatura, e seus valores podem ser obtidos via carta psicrométrica.

Para entender a dinâmica da umidade absoluta na sala, devemos analisar o funcionamento do sistema de climatização híbrido (Figura 3), e considerar o princípio da conservação de massa.

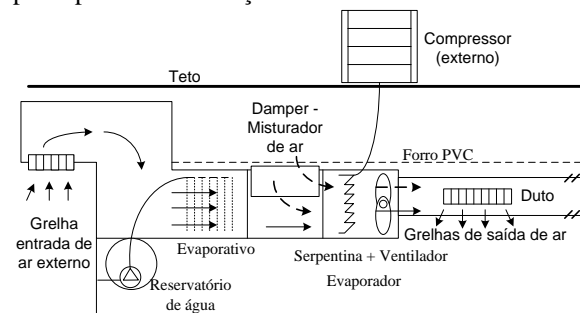


Figura 3. Fluxo de ar na climatização híbrida. -- conv. – híbrido.

O sistema opera em dois modos, e para cada um deles a dinâmica da umidade absoluta é diferente. O *damper* é o elemento que comuta o sistema entre o modo evaporativo (*damper* fechado, compressor

desligado) e o modo convencional (*damper* aberto, compressor ligado). Para qualquer um dos modos o ventilador sempre está ligado a uma velocidade constante, assim sempre haverá uma pressão positiva para que a massa de ar circule pelos ambientes.

No modo convencional (*damper* aberto), temos a circulação fechada do ar ambiente passando pelas serpentinas ($\sim 14^\circ\text{C}$) da unidade evaporadora convencional. Nesta condição a manta de celulose oferece resistência à passagem do ar, propiciando uma climatização convencional, baseada na compressão e expansão do gás refrigerante.

No modo evaporativo (*damper* fechado), este fluxo se dá do ambiente externo para a sala de reuniões e deste para a sala vizinha. Temos vazão mássica de entrada, que é a massa de ar que entra na sala através do duto conectado ao exterior, sendo a massa de ar do ambiente externo acrescentado de certa quantidade de vapor d'água pela manta de celulose.

A vazão mássica de saída é a massa de ar que sai da sala através da grelha da porta e por baixo da mesma para o ambiente vizinho. Como o fluxo de ar seco é constante a diferença entre a massa de vapor d'água dessas vazões é a quantidade de umidade absoluta na sala.

2.3 Modelo da umidade

Assim como foi feito para o modelo estruturado para a temperatura, as vazões mássicas são modeladas por funções de transferência de primeira ordem.

Para obter um único modelo que represente os dois modos de funcionamento é utilizado o sinal de acionamento entre estes modos. Porém o modelo utiliza a umidade absoluta enquanto que a variável de controle é a umidade relativa. Para fazer a conversão entre estas propriedades são utilizados blocos do tipo “*S-Function*”, que aplicam as equações psicrométricas propostas por Singh (2002). O modelo para a umidade da sala é mostrado na figura 6.

O sistema dinâmico é representado por funções de primeira ordem com os respectivos ganhos e constantes de tempo para cada variável de entrada e para a sala. Para obtermos um modelo completo que represente, simultaneamente, a dinâmica da temperatura e da umidade em um ambiente, devemos considerar a influência da umidade sobre a temperatura da e vice-versa. A evaporação da água no ambiente ao diminuir a umidade absoluta da mesma, produz um fluxo de calor, representado por mais um bloco de entrada no modelo de princípios fundamentais proposto. Um modelo completo é proposto na figura 6.

3 Método de Identificação

3.1 Aquisição dos dados

A aquisição de dados para fins de identificação foi realizada com controladores MT531Ri da *Full Gauge Controls*, que possuem sensores de temperatura e umidade na sala, no ambiente externo e vizinho, e

num ponto localizado após a manta de celulose. Os controladores controlam a temperatura e umidade da sala via software *Sitrad*®. O software permite apenas que o usuário estabeleça os parâmetros de controle do tipo liga/desliga. Para a aquisição de dados foram escolhidos parâmetros de forma a excitar o processo, sem haver qualquer preocupação em direcionar o ambiente a um ponto de operação específico, apenas para coletar medidas de temperatura e umidade relativa. Os parâmetros adotados são: Setpoint de Temperatura = 22°C com histerese de 1°C . Setpoint de Umidade = 55% com histerese de 5%.

Outra condição importante para a identificação é a quantidade de dados adquiridos. Por se tratar de um sistema térmico onde as constantes de tempos são grandes, é necessário que os dados sejam coletados por um longo período. A taxa de amostragem escolhida foi de 10 segundos. O experimento se iniciou no dia 25/01/2013 e se encerrou no dia 30/01/2013, totalizando cinco dias de medições. Os gráficos dos resultados obtidos são mostrados nas figuras 4 e 5.

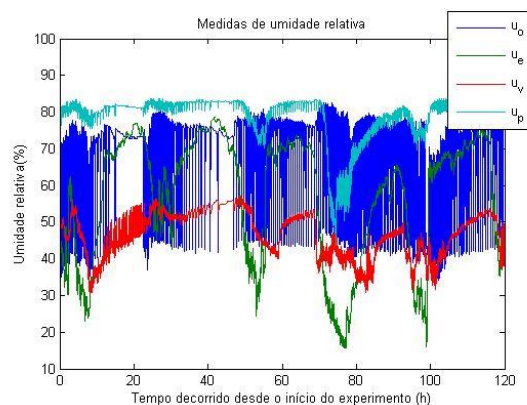


Figura 4. Umidade relativa da sala de reuniões (u_o), do ambiente externo (u_e), sala vizinha (u_v) e pós-evaporativo (u_p).

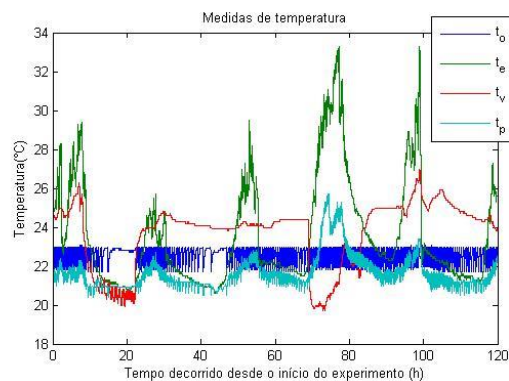


Figura 5. Temperatura da sala de reuniões (t_o), do ambiente externo (t_e), vizinhança (t_v) e pós-evaporativo (t_p).

3.2 Identificação caixa cinza

Na identificação caixa cinza utiliza-se de um conhecimento prévio do sistema. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo estruturado por princípios fundamentais que representa a dinâmica da umidade e temperatura da sala (figura 6). Para essa identificação foi utilizada a metodologia proposta por Ghiaus (2006).

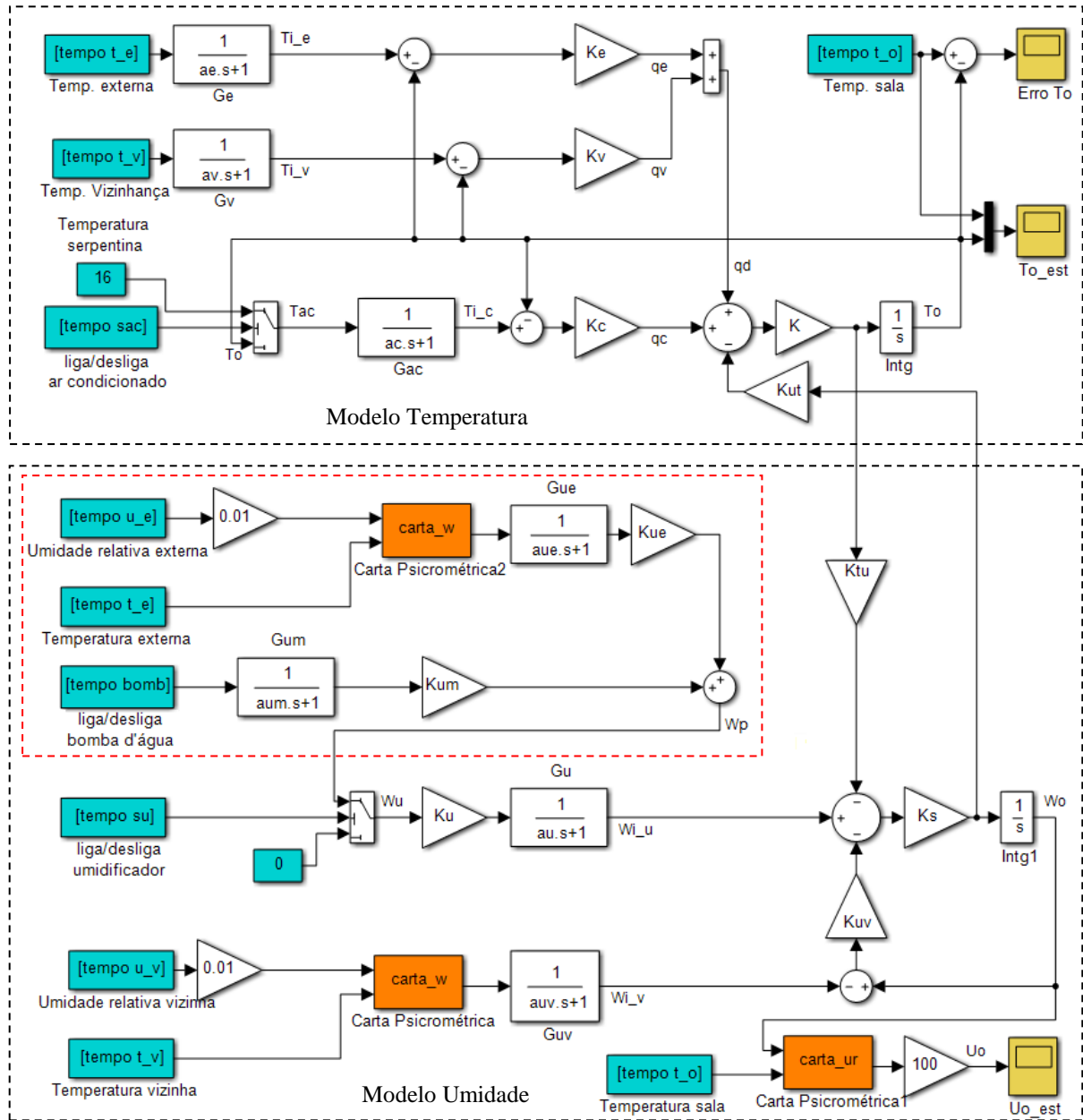


Figura 6. Modelo completo estruturado por princípios fundamentais para o ambiente de estudo – temperatura e umidade

Para aproveitar do conhecimento do sistema é utilizado o algoritmo idgrey do MATLAB®. Este algoritmo cria um modelo que representa um sistema no espaço de estados, com parâmetros identificáveis (ou estimáveis) fornecidos previamente. Para a forma discreta o modelo possui a seguinte forma:

$$\begin{aligned} x[k+1] &= Ax[k] + Bu[k] + Ke[k] \\ y[k] &= Cx[k] + Du[k] + e[k] \end{aligned} \quad (1)$$

O ruído $e[k]$ é considerado como desprezível e a matriz K é colocada como nula. O restante das matrizes contém os elementos a serem estimados, podendo alguns deles já serem conhecidos. Os parâmetros desconhecidos (ψ) são estimados pela minimização do erro de predição:

$$V_n(\Psi) = \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t | \Psi)]^2 \quad (2)$$

Onde V_n é o critério do erro de predição, $y(t)$ o valor medido para o instante t e $\hat{y}(t | \Psi)$ o valor com os parâmetros estimados para o instante t . O valor mínimo da equação acima, denotado por $\hat{\Psi}_N$, é encontrado de forma iterativa utilizando o método de Gauss-Newton amortecido:

$$\hat{\Psi}_N^{(i+1)} = \hat{\Psi}_N^{(i)} + \mu R_N^{(i)} V_N'(\hat{\Psi}_N^{(i)}) \quad (3)$$

Onde $R_N^{(i)}$ é a matriz de ganho e μ é um fator de ponderação utilizado para normalizar o ganho (Ljung, 1999). Este método requer um valor inicial arbitrário para os parâmetros. Dependendo desse valor as iterações podem não convergir, convergir para um mínimo local ou convergir para o valor desejado do mínimo global. As estimativas iniciais dos parâmetros devem estar no domínio de atração do mínimo global (Parrilo & Ljung, 2003).

A complexidade do modelo umidade impôs dificuldades para se utilizar o algoritmo idgrey. A estratégia utilizada foi estimar os parâmetros do modelo em duas etapas. Na primeira procura-se estimar os parâmetros da parte pontilhada em vermelho da figura 6, onde são utilizados como entradas os sinais de umidade absoluta externa (w_e) e do sinal de acionamento da bomba d'água (S_b) e como saída a umidade absoluta pós evaporativo (w_p). O sinal w_p irá compor o sinal efetivo de umidade absoluta do umidificador (w_u), sendo igual à zero no modo convencional e igual à w_p estimado no modo evaporativo.

A segunda etapa faz a identificação do restante dos parâmetros do modelo completo, utilizando como entradas o sinal de umidade absoluta efetiva do umidificador (w_u) e umidade absoluta vizinha (w_v) e como saída o sinal de umidade absoluta da sala (w_o).

3.2.1 Primeira etapa de identificação

A partir da figura 6 é possível obter o modelo de espaço de estados e extrair as matrizes que serão utilizadas no algoritmo idgrey para a primeira etapa. Tomando os estados $x = [w_p \ w_{ie} \ w_{ib}]^T$, temos que:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1/a_{ue} & -1/a_{um} \\ 0 & -1/a_{ue} & 0 \\ 0 & 0 & -1/a_{um} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} K_{ue}/a_{ue} & K_{um}/a_{um} \\ K_{ue}/a_{ue} & 0 \\ 0 & K_{um}/a_{um} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0] \quad (6)$$

Como o modelo no espaço de estado obtido é contínuo, deve-se converter para um modelo discreto. O procedimento de discretização de matrizes é descrito por Ogata (1987). Os elementos desconhecidos das matrizes de estado são passados ao algoritmo como os parâmetros a serem identificados.

3.2.2 Segunda etapa de identificação

Analisando o modelo completo da figura 6, extraem-se as matrizes de espaço de estado para serem utilizadas no algoritmo. Tomando os estados $x = [t_o, t_{ie}, t_{iv}, t_{ic}, w_o, w_{iu}, w_{iv}]^T$ e $y = [t_o, w_o]^T$, considerando que $(1 - K_{ut}K_{tu}K_s) = \alpha$, temos:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \frac{K_e K}{\alpha} & \frac{K_v K}{\alpha} & \frac{K_c K}{\alpha} & a_{15} & \frac{-KK_{ut}K_s}{\alpha} & -a_{15} \\ 0 & -1/a_e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/a_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/a_c & 0 & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & K_s/\alpha & -a_{55} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/a_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/a_{uv} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{-K(K_e + K_v + K_c)}{\alpha}; a_{15} = \frac{KK_{ut}K_sK_{uv}}{\alpha}; \\ a_{51} &= \frac{KK_sK_{iu}(K_e + K_v + K_c)}{\alpha}; a_{52} = \frac{-K_eKK_sK_{iu}}{\alpha}; \\ a_{53} &= \frac{-K_vKK_sK_{iu}}{\alpha}; a_{54} = \frac{-K_cKK_sK_{iu}}{\alpha}; a_{55} = \frac{-K_sK_{uv}}{\alpha} \end{aligned} \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/a_e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/a_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/a_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_u/a_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/a_{uv} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

É realizado o mesmo procedimento de discretização. Devido ao tamanho das matrizes e da quantidade de parâmetros, tornou-se inviável apresentá-las, portanto as matrizes discretas serão omitidas.

4 Resultados

A validação do modelo obtido se dá através de simulação do preditor de um passo a frente e a comparação com o sinal real medido. Para a primeira etapa:

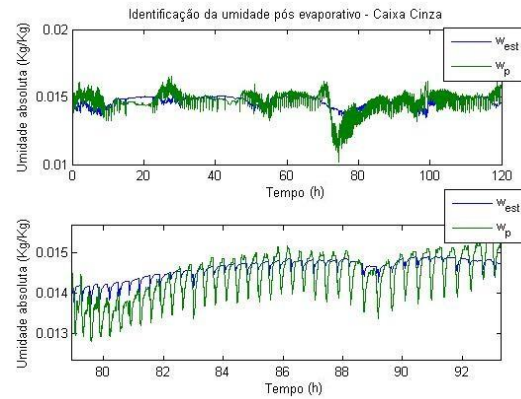


Figura 7. Umidade absoluta pós evaporativo (w_p) e estimada (w_{est}) para todo o experimento e para determinado intervalo de tempo.

Na segunda etapa foi obtido o seguinte resultado:

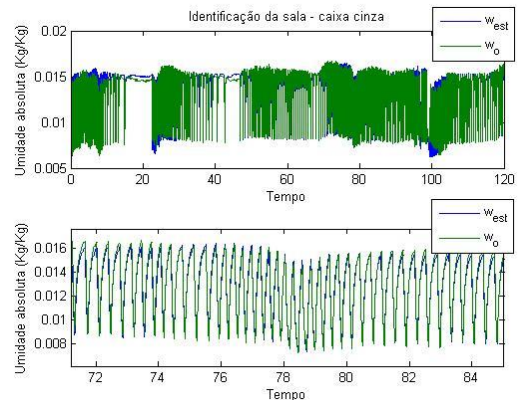


Figura 8. Umidade absoluta da sala (w_o) e estimada (w_{est}) para todo o experimento e para determinado intervalo de tempo.

Para melhor avaliar o resultado foi utilizada a “System Identification Tool” do MATLAB®, que fornece o erro do modelo simulado, além de calcular o fitness, que é a porcentagem na qual os valores estimados se encaixam nos valores reais.

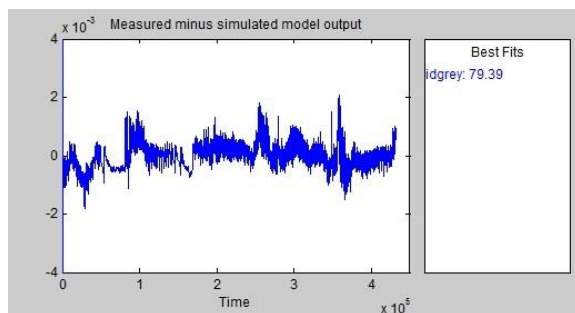


Figura 9. Erro absoluto e *fitness* para a primeira etapa da identificação.

A fim de fazer uma comparação com o método caixa preta, que é o mais usual, foi utilizado o algoritmo *n4sid* do MATLAB®, de modo que o modelo estimado tivesse a mesma ordem e as mesmas entradas do modelo caixa cinza. A tabela 1 mostra a comparação do fitness, do erro absoluto médio (EAM) e do erro percentual médio (EPM).

Tabela 1. Resultados obtidos com os métodos caixa cinza e caixa preta.

<i>Método</i>	<i>Fitness</i> (%)	<i>EAM</i> (kg/kg)	<i>EPM</i> (%)
Caixa Cinza	79,39	5,3e-04	4,17
Caixa Preta	81,13	3,6e-04	2,88

Por último a tabela 2 apresenta os parâmetros do modelo da umidade estimados pelo *idgrey*.

Tabela 2. Parâmetros estimados.

<i>i</i>	<i>u</i>	<i>uv</i>	<i>ue</i>	<i>um</i>	<i>s</i>
ai	168,5	164,9	80,82	171,7	-
Ki	2,19	3,77	0,151	-0,003	0,029

5 Conclusões

Este trabalho apresentou a identificação de um ambiente no qual está instalado um sistema de climatização híbrido. A identificação possibilita o projeto de controladores eficientes em prover conforto térmico com eficiência energética.

A estruturação do ambiente por princípios fundamentais se mostrou complexa no sentido de se obter o melhor modelo que representasse a dinâmica da umidade da sala, porém depois de obtê-lo este pode ser reaproveitado em outros ambientes, fazendo-se alguns ajustes necessários. Isto é possível devido ao fato da abordagem por princípios fundamentais possuir significado físico, de modo que os parâmetros encontrados pela identificação podem ser

avaliados e discutidos, já que representam os parâmetros reais do ambiente.

A utilização do algoritmo *idgrey* na identificação caixa cinza se mostrou eficiente em estimar os parâmetros do modelo estruturado, considerando o pequeno erro entre os valores reais e os valores estimados. Ao se utilizar o algoritmo percebeu-se a influência dos valores iniciais no resultado do modelo estimado. O valor inicial deve estar no domínio de atração do algoritmo para que não ocorram problemas de convergência, ou convergir para um valor indesejado (mínimo local). No contexto da identificação caixa cinza, como os parâmetros tem significado físico, pode-se obter boas escolhas iniciais com a análise do modelo, que foi o caso deste trabalho.

Comparado a métodos de identificação caixa-preta, obtivemos um modelo que apresenta bons resultados e que não é tão sensível em relação aos dados utilizados na identificação. Além disso, o modelo obtido é válido para grandes sinais. Isto é uma grande vantagem, pois permite utilizar o modelo na racionalização do consumo de energia (ciclo de trabalho da climatização híbrida varrendo o potencial de umidificação disponível).

Referências Bibliográficas

- Aguirre, L. A. (2007). Introdução à Identificação de Sistemas - técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais 3a ed. Editora UFMG, Belo Horizonte.
- Bauchpiess, A., Ishihara, J. Y., Felgner, F. e Litz L. (2006). “First-Principles Structured Identification for Predictive HVAC Control” CLCA2006, Salvador, 6pp.
- Fraisse, G., Viardot, C., Lafabrie, O., Archand, G. (2002). Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy. *Energy and Buildings* 34(2002) 1017-1031.
- Ghiaus, C., Chicinas, A., Inard, C. (2005). Grey-Box Identification of air-handling unit elements. *Control Engineering Practice* 15(2007) 421-433.
- Ljung, L. (1999). *System Identification – Theory for the user*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. PTR
- Olmos, C. C. (2009). Sistema híbrido de climatização visando conforto térmico e eficiência energética. Dis. Mestrado, Universidade de Brasília, 81p.
- Parrilo, P., and Ljung, L. (2003). Initialization of physical parameters estimates. Linköping, Sweden: Linköping Universitet p. 9.
- Singh, A. K., Singh H., Singh S. P., Sawhney, R. L. (2002). Numerical calculation of psychrometric properties on a calculator. *Building and Environment* 37(2002) 415-419.
- OGATA, K. *Discrete-time control systems*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984p. 1987.