

PROJETO DE CONTROLADOR PI NEBULOSO APLICADO AO SISTEMA CLIMATIZAÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO

Leandro dos Santos Coelho

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Rua Imaculada Conceição, 1155 — Bairro Prado Velho — Curitiba — PR
leandro.coelho@pucpr.br

Humberto Xavier de Araújo

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Rua Imaculada Conceição, 1155 — Bairro Prado Velho — Curitiba — PR
humberto.araujo@pucpr.br

Gustavo Henrique da Costa Oliveira

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Rua Imaculada Conceição, 1155 — Bairro Prado Velho — Curitiba — PR
gustavo.oliveira@pucpr.br

Nathan Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Laboratório de Sistemas Térmicos (LST)
Rua Imaculada Conceição, 1155 — Bairro Prado Velho — Curitiba — PR
nathan.mendes@pucpr.br

Resumo. O objetivo deste artigo é apresentar e avaliar o projeto de um controlador PI (proporcional e integral) nebuloso aplicado a um sistema HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) de uma edificação. O ambiente de simulação usado é o Astecca, este desenvolvido com o *software* Matlab/Simulink, para calcular a resposta da edificação aos sinais de controle para ajuste da temperatura de ar interna e umidade relativa interna desejados. O estudo de casos de duas cidades brasileiras, Brasília e Curitiba, são desenvolvidos e avaliados com o controle PI nebuloso. Os resultados de simulação da aplicação do controlador nebuloso são apresentados. Os resultados mostram que a estratégia de controle nebuloso proposta tornou possível gerar economia de energia do sistema HVAC.

Palavras chave: ferramenta de simulação, sistemas térmicos, controle nebuloso, controle de sistemas.

1. Introdução

A criação de condições de conforto térmico para ocupantes de casas e edifícios tanto comerciais quanto industriais é uma meta essencial da indústria de projeto e concepção de sistemas de HVAC (*Heating, Ventilating and Air-Conditioning*). Neste contexto, existe um crescente interesse na formulação de novas abordagens de que possam ser utilizadas em controladores de sistemas de HVAC.

A expansão da tecnologia dos computadores nos anos 1980 ajudou a introduzir conceitos de edificações “espertas” ou “inteligentes” (“*smart*” or “*intelligent*” buildings), visando prover eficiência energética e melhores condições ambientais em edificações de forma a: (i) reduzir o consumo de energia e poluição ambiental, (ii) manter a segurança para as pessoas, máquina, produção e ambiente, (iii) aprimorar a eficiência do processo e redução do tempo de processamento, (iv) aumentar a transparência das características dos processos pela utilização de instrumentação, (v) gerenciar uma manutenção orientada por operação de instalações técnicas em relação ao tempo de operação de máquinas e redução de custos de manutenção, (vi) analisar dados históricos, (vii) assegurar o bem estar das pessoas para aumento da produtividade, e (viii) reduzir consumo energético pela operação ótima do sistema de HVAC (Talebi-Daryani, 2001).

Nos últimos anos, diversas metodologias de projeto de controladores têm sido propostas para o projeto de controladores para sistemas HVAC, principalmente para controle de temperatura. Entre estas metodologias destacam-se controladores *on-off*, proporcional-integral-derivativo, adaptativo, preditivo, robusto e inteligente.

Recentemente, a combinação das vantagens da eletrônica, informática, técnicas de controle moderno e da teoria da inteligência artificial têm motivado o desenvolvimento de novas metodologias na área de controle inteligente. Estas metodologias têm sido reportadas na literatura e podem ser destacadas algumas. Manish & Woo (1996) compararam controle nebuloso, controle supervisão nebuloso e controle clássico proporcional-integral-derivativo para um sistema de controle de temperatura. Ying-guo *et al.* (1998) propuseram um controlador nebuloso adaptativo baseado em projeto de modos deslizantes para o controle de um sistema de HVAC através de simulações. Pang & Mesbah (1998) propuseram um projeto de controle *bang-bang* baseado em sistemas nebulosos e redes neurais para uma aplicação em sistemas térmicos. Kolokotsa *et al.* (2001) apresentaram e avaliaram estratégias de controle nebuloso visando o ajuste e a preservação da qualidade do ar, o conforto térmico para ocupantes de edificações e a redução do consumo de energia.

Gottschalk *et al.* (2003) apresentaram um controlador nebuloso para aprimoramento do controle climático em sistemas de armazenamento de batatas para condições climáticas do Leste Europeu.

A contribuição deste artigo é o projeto e a análise do desempenho de um controlador proporcional-integral (PI) nebuloso baseado em modelo nebuloso de Mamdani, este um controlador classificado como “inteligente”, aplicado ao controle de temperatura e umidade do sistema de climatização de uma edificação.

O artigo é organizado da seguinte maneira. Na seção 2, os conceitos de três sistemas de controle nebuloso são apresentados. A descrição de um sistema higrótérmico de aquecimento é discutida na seção 3. Os resultados de simulação e a conclusão são apresentados e discutidos nas seções 4 e 5, respectivamente.

2. Sistemas nebulosos

A contribuição central dos sistemas nebulosos é a de constituir-se de uma metodologia apta ao tratamento de imprecisão, raciocínio aproximado, sistemas baseados em regras e manipulação de termos lingüísticos. Os sistemas nebulosos possibilitam a expressão de conceitos que não sejam bem definidos, onde usualmente é empregado um nome ou adjetivo para descrevê-lo. A concepção lingüística da teoria dos sistemas nebulosos habilita também a fusão de processamento simbólico e computação numérica, provendo uma metodologia para problemas de decisão e controle, motivando a implementação de controladores nebulosos. A estrutura básica de um sistema nebuloso pode ser projetada constituindo-se de:

- (i) *base de regras*, que contém um conjunto de regras nebulosas;
 - (ii) *base de dados*, que define as funções de pertinência das regras nebulosas;
 - (iii) *mecanismo de inferência*, que executa os procedimentos de inferência sobre as regras e condição para obtenção de uma saída;
 - (iv) *fase de nebulização* (a transformação das entradas *crisp* em conjuntos nebulosos). Uma observação relevante é que nem todos os sistemas nebulosos possuem esta fase;
 - (v) *fase de desnebulização* (a transformação dos resultados nebulosos de inferência em saídas de dados *crisp*).
- Observação: Em inglês, conjuntos no sentido clássico são referidos como *crisp sets*.

Neste artigo aborda-se um modelo nebuloso baseado em regras, ou também denominado de modelo lingüístico ou modelo Mamdani. Os modelos nebulosos lingüísticos são baseados em regras *se-então* apresentando predicados vagos e utilizando raciocínio nebuloso. Nestes modelos, as quantidades nebulosas são associadas aos termos lingüísticos, e o modelo nebuloso é essencialmente uma expressão qualitativa do sistema. Os modelos, deste tipo, formam a base de modelagem qualitativa, que descreve o comportamento de um sistema através da utilização da linguagem natural. O representante mais significativo desta classe é o modelo do tipo Mamdani (Mamdani & Assilian, 1975). O modelo de Mamdani caracteriza-se por utilizar os conjuntos nebulosos como consequentes das regras de produção, ou seja,

$$R_i: \text{ se } x_1 \text{ é } A_{i,1} \text{ e } \dots \text{ e } x_m \text{ é } A_{i,m} \text{ então } y \text{ é } C_i \quad (1)$$

onde x_i são as variáveis de entrada, y é a variável de saída, A_i e C_i são conjuntos nebulosos.

Este tipo de sistema nebuloso quando direcionado ao projeto de um controlador nebulosos é constituído de um conjunto de regras relativamente simples que descrevem como a variável manipulada deve mudar em resposta a mudanças na variável controlada, e em alguns controladores, a mudanças na variável de perturbação. Estas regras são freqüentemente obtidas pela entrevista com operadores (ou especialistas humanos) do processo, e então usando engenharia do conhecimento para obtenção de um base de regras consistente e completa. Na próxima subseção são detalhados estes aspectos de projeto e validação de sistemas de controle nebuloso.

2.1. Sistemas de controle nebuloso

A teoria de controle clássica permite projetar controladores tendo informação imprecisa sobre o processo a ser tratado. Esta teoria, no entanto, apresenta limitações no tratamento de processos complexos, devido a não-linearidades e comportamentos variantes no tempo. Contudo, os operadores humanos controlam, freqüentemente, com sucesso, diversos processos complexos. Os operadores humanos são capazes de controlar baseados em informações imprecisas e/ou incertas a respeito do funcionamento de processos. A estratégia de controle, adotada pelos operadores humanos, é de natureza imprecisa e, geralmente, pode de ser expressa em termos lingüísticos.

Os sistemas nebulosos possuem um formalismo para a representação do conhecimento e inferência de novos conhecimentos que é similar à maneira utilizada pelos seres humanos para expressarem o conhecimento e raciocínio, ao contrário dos sistemas baseados em lógica clássica.

Diversas técnicas de controle moderno vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de melhorar o desempenho dos controladores PID (proporcional, integral e derivativo) clássicos. Nos últimos anos observa-se um acentuado crescimento de aplicações e sofisticação dos sistemas de controle avançados que empregam conceitos da teoria

dos sistemas nebulosos ou *fuzzy* (Isermann, 1998; Yen, 1999). Neste contexto, o controle lógico nebuloso tem se mostrado uma alternativa viável ao controle clássico no controle de processos com parâmetros variantes no tempo, não-lineares e com informações imprecisas. As leis de controle nebuloso (no caso de controladores lingüísticos do tipo Mamdani) são definidas por regras lingüísticas em uma base de regras. Usando os conceitos da lógica nebulosa, as regras podem ser processadas com um formalismo matemático. Se as regras lingüísticas são conhecidas, o engenheiro de controle tem ainda que escolher o número de conjuntos nebulosos, as funções de pertinência, a normalização dos fatores de escala e a definição do universo de discurso.

Para implementar um controlador nebuloso, o projetista necessita não somente de heurística, mas também de alguns procedimentos teóricos na síntese e análise do projeto. Geralmente, a concepção de um controle nebuloso é um projeto de controle não-linear. Assim, é uma tarefa difícil examinar-se a influência de cada parâmetro no desempenho e robustez do seu projeto. O procedimento de projeto adotado para o controlador nebuloso baseado em regras (tipo Mamdani) é sintetizado pelos seguintes passos: (i) definir as funções de pertinência das entradas e das saídas; (ii) selecionar a(s) entrada(s) de controle; (iii) especificar as regras associadas às funções de pertinência; (iv) selecionar o método de inferência associado às regras de produção; (v) selecionar o método de nebulização e desnebulização; e (vi) avaliação do controlador. A estrutura geral de um controlador nebuloso do tipo Mamdani é apresentada na Fig. 1.

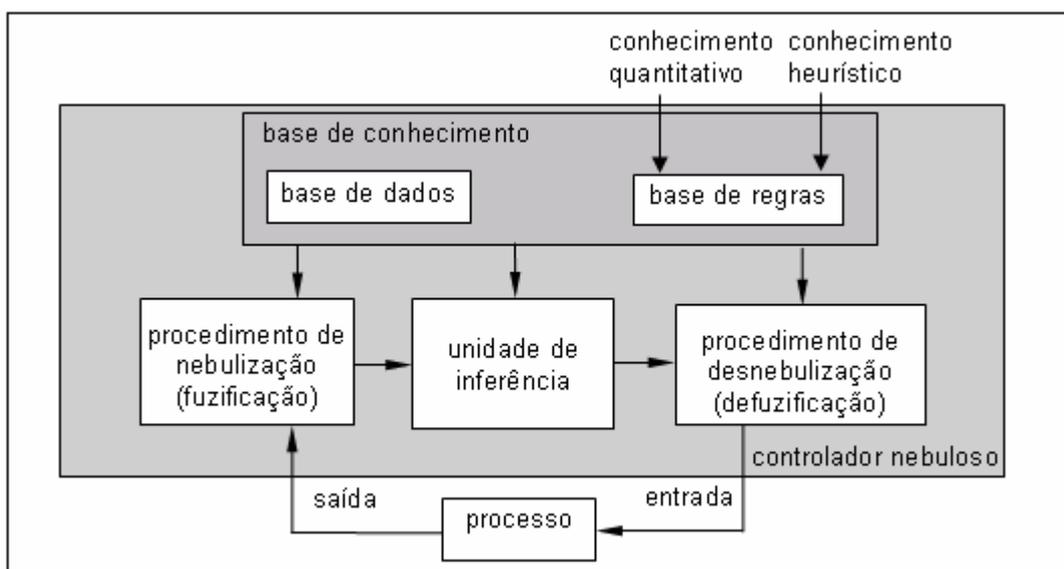


Figura 1. Estrutura geral de um controlador nebuloso baseado em regras (modelo de Mamdani).

Adicionalmente, as estruturas de controle PID são bastante disseminadas na comunidade de controle e sendo a principal técnica utilizada na indústria (Åström & Hägglund, 1995). Nos últimos anos, os controladores nebulosos combinados a estruturas de controle PID são utilizados em controle de processos industriais devido a sua natureza heurística associada com a simplicidade e a eficiência de ambos sistemas de controle linear e não-linear. Muitos dos controladores nebulosos, empregados em processos monovariáveis, são essencialmente do tipo PI, PD, ou PID com ganhos não-lineares.

Devido a não-linearidade dos ganhos de controle, os controladores nebulosos do tipo PID, quando sintonizados de forma adequada, podem apresentar desempenho similar ou mesmo superior aos controladores PID convencionais fornecendo o tratamento de não-linearidades. A presença de não-linearidades dificulta a análise teórica para explicar os mecanismos que fazem com que os controladores *PID* nebulosos possam apresentar melhor desempenho (Mann *et al.*, 1999).

O controle PID é utilizado na maioria dos sistemas de controle industriais, principalmente devido a sua simplicidade e eficiência. Entretanto, o PID apresenta dificuldades no controle de processos complexos que são, usualmente, não-lineares, especialmente quando a dinâmica do sistema apresenta incertezas estruturais e paramétricas.

A sensibilidade ou robustez de um controlador nebuloso do tipo PID pode ser investigada pela mudança de parâmetros do modelo do processo. O controlador nebuloso do tipo PID, quando projetado de forma adequada, é menos sensível a grandes mudanças paramétricas do processo e é comparável em desempenho ao controlador PID convencional para pequenas mudanças paramétricas. A seguir são detalhados os projeto de controle nebuloso avaliados em um sistema térmico de aquecimento.

2.2. Projeto do controlador PI nebuloso

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

$$\Delta u(t) = \mathfrak{F}[e(t), \Delta e(t)] \quad (2)$$

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \quad (3)$$

Neste caso, o sinal de erro $e(t)$ é dado por $e(t) = w(t) - y(t)$, considerando que $y(t)$ é a variável controlada do processo e $w(t)$ é o sinal de referência (*set point*) ou saída desejada para o processo. O sinal $u(t)$ representa o sinal de controle do processo; Δ é um operador, tal que $\Delta x(t) = x(t) - x(t-1)$. Nesta estrutura de controle, o sinal $\Delta u(t)$ é utilizado para incorporar um termo integral no ramo direto da malha de controle e eliminar, desta forma, erros em regime permanente para perturbações constantes. O termo $\Delta e(t)$ incorpora a tendência do sinal de erro na lei de controle (Oliveira *et al.*, 2003a).

Diversos controladores em tempo discreto possuem a estrutura descrita pelas equações (2) e (3). Um exemplo clássico é o controlador PI digital dado por (Åström & Hägglund, 1995):

$$\Delta u(t) = c_0 e(t) + c_1 \Delta e(t) \quad (4)$$

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \quad (5)$$

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

O sistema de controle nebuloso adotado — lingüístico do tipo Mamdani — assume que a lei de controle está estruturada em regras de produção do tipo SE <condição> ENTÃO <ação>. A base de regras concebida neste artigo é construída a partir da experiência do operador sobre o funcionamento e as características do processo sob controle.

Utilizando a estrutura estabelecida pelas equações (1) e (2), obtém-se um controlador nebuloso cujo modo de operação é análogo ao controlador PI (Tang & Mulholland, 1987). Nesta estrutura, os sinais $e(t)$, $\Delta e(t)$ e $\Delta u(t)$ são transformados em variáveis lingüísticas nebulosas (operação nebulização ou fuzificação) que são definidas em um universo de discurso normalizado, isto é, $\{e(t), \Delta e(t), \Delta u(t)\} \in [-1, 1]$. Para estabelecer a semântica das regras, são definidos conjuntos nebulosos com uso dos termos lingüísticos: *Negativo Grande* (NG), *Negativo Médio* (NM), *Negativo Pequeno* (NP), *Zero* (Z), *Positivo Pequeno* (PP), *Positivo Médio* (PM) e *Positivo Grande* (PG).

Como os universos de discurso são normalizados, é necessária uma ponderação para adequar o universo de discurso com os valores reais dos sinais de entrada e saída. Assim, o sistema de controle é dado por:

$$\Delta u(t) = \mathfrak{F}[k_e e(t), k_{\Delta e} \Delta e(t)] \quad (6)$$

$$u(t) = u(t-1) + k_u \Delta u(t) \quad (7)$$

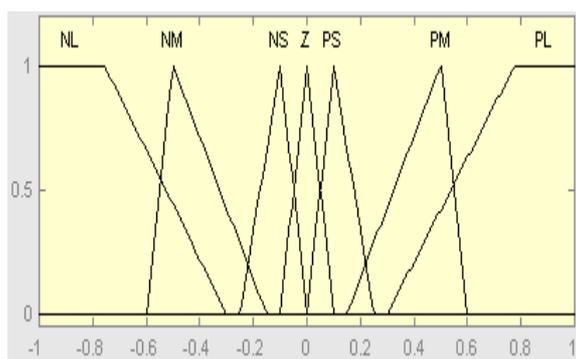
onde as ponderações (fatores de escala) k_e , $k_{\Delta e}$ e k_u são utilizadas como parâmetros de projeto para sintonia dos controladores de temperatura e umidade.

Uma abordagem heurística é adotada, neste artigo, para o projeto das entradas, base de regras e funções de pertinência do controlador PI nebuloso, esta baseada em Albertos (1992). Uma metodologia de projeto e sintonia de um controlador PI nebuloso, tanto para controle de temperatura quanto umidade, é adotada de forma a:

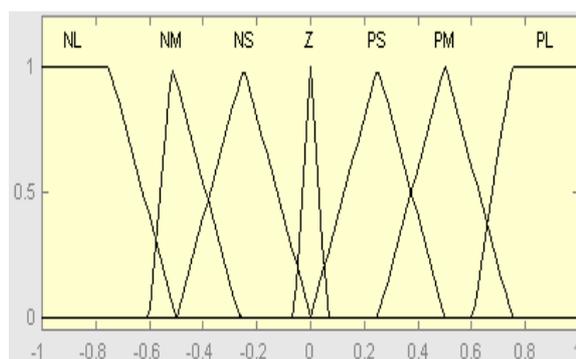
- (i) começar com uma lei de controle simples, no presente caso um controlador proporcional, com:
 - ganho reduzido k_c visando manter a saída do processo estável mesmo que apresentando comportamento de resposta lento;
 - variáveis mais relevantes (adotada inicialmente somente o erro, $e(t)$, como variável de entrada, e a variação do controle, $\Delta u(t)$, a variável de saída);
 - número reduzido de variáveis lingüísticas e funções de pertinência (inicialmente usando 2 variáveis lingüísticas e 3 funções de pertinência: NG, Z, PG);
 - incluir de forma gradual as regras que constituirão a base de regras do controlador;
 - incrementar o ganho até que alguma resposta indesejada seja obtida do sistema térmico.
- (ii) adicionar conhecimento de acordo com a experiência adquirida, ou seja,

- procurar por novas variáveis físicas ou lingüísticas (adotada a variação do erro, $\Delta e(t)$) para abordar com novas dificuldades de controle;
- ajustar as funções de pertinência e os parâmetros do controlador, isto é, ajuste dos parâmetros das funções de pertinência triangulares e trapezoidais adotadas no projeto do PI nebuloso e os fatores de escala k_e , $k_{\Delta e}$ e k_u , do controlador;
- adicionar novos componentes ou mudanças na estrutura de controle. Neste caso os testes iniciais foram para 3 funções de pertinência para cada variável (erro, variação do erro e controle); após os ajustes iniciais foi realizada uma sintonia fina usando 7 funções de pertinência para cada variável de projeto.

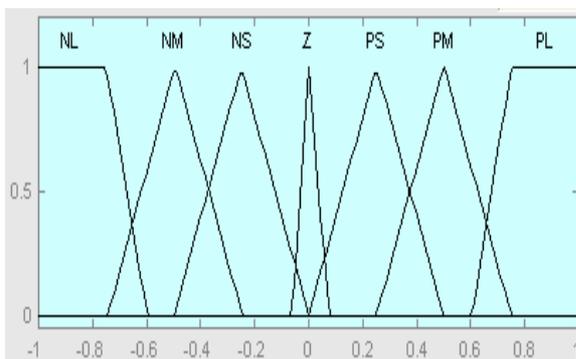
As funções de pertinência e a base de regras obtidas dos conjuntos nebulosos $e(t)$, $\Delta e(t)$ e $\Delta u(t)$ são ilustradas nas Figs. 2 e 3 e Tab. 1, estas implementadas em ambiente Matlab/Simulink. Os dois controladores nebulosos projetados possuem a mesma base de regras, no entanto, eles diferem por possuírem fatores de escala (k_e , $k_{\Delta e}$ e k_u) e ajustes das funções de pertinência diferentes.



(a) funções de pertinência para o erro $e(t)$

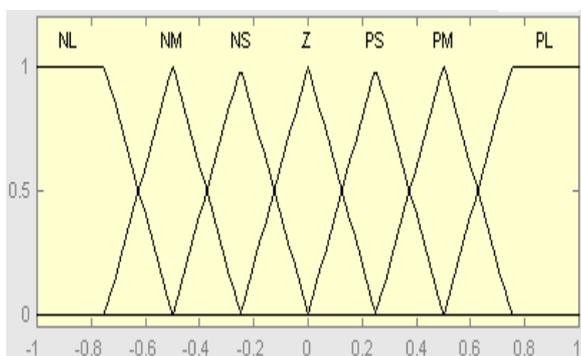


(b) funções de pertinência para a variação do erro $\Delta e(t)$

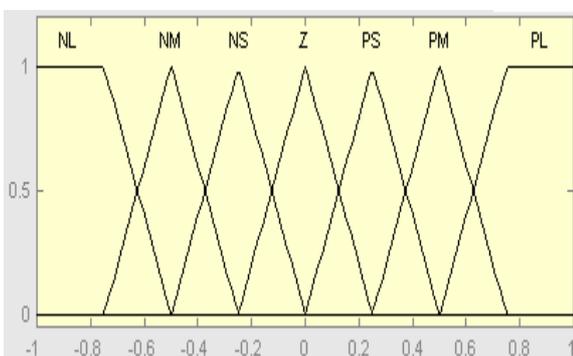


(c) funções de pertinência para a variação do sinal de controle de temperatura, $\Delta u(t)$

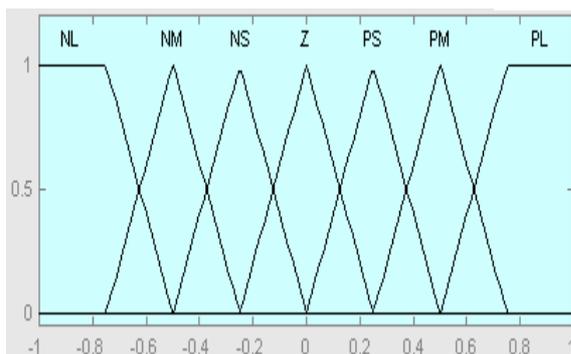
Figura 2. Funções de pertinência para o controlador PI nebuloso aplicado ao controle de temperatura.



(a) funções de pertinência para o erro $e(t)$



(b) funções de pertinência para a variação do erro $\Delta e(t)$



(c) funções de pertinência para a variação do sinal de controle de umidade, $\Delta u(t)$

Figura 3. Funções de pertinência para o controlador PI nebuloso aplicado ao controle de umidade.

Tabela 1. Base de regras para os controladores PI nebulosos aplicado ao controle de temperatura e umidade. Exemplo da convenção adotada: elemento (5,3) da matriz: SE $e(t)$ é NP E $\Delta e(t)$ é PP ENTÃO $\Delta u(t)$ é Z

$e(t) \rightarrow$ $\Delta e(t)$ ↓	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG				NG	NM		
NM				NM			
NP				NP	Z		PM
Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PP	NM		Z	PP			
PM				PM			
PG			PM	PG			

3. Descrição do sistema térmico

Esta seção apresenta um resumo do equacionamento higrotérmico contido no ambiente computacional Astecca, esta uma ferramenta de simulação para a análise do comportamento higrotérmico de edificações e para o estudo de estratégias de controle aplicadas a sistemas de climatização HVAC. O ambiente computacional Astecca, desenvolvido em plataforma Matlab/Simulink, descrito em Mendes *et al.* (2002), Oliveira *et al.* (2003a, 2003b) e Sierakovski *et al.* (2004), contém modelos matemáticos de edificações, sistemas HVAC, sensores e perturbações, dados climáticos e algoritmos de controle. Os modelos matemáticos são baseados em equações de estado e são obtidos através do balanço de massa e energia, levando-se em consideração diversos fenômenos termofísicos.

Esta seção apresenta também um modelo dinâmico para a análise de desempenho higrotérmico de um edifício (Mendes *et al.*, 2002), este usado na análise do desempenho de controlador PI nebuloso. O modelo dinâmico proposto e utilizado para análise do comportamento térmico de uma sala com um aquecedor elétrico penta-aletado, cujo fluido circulante é óleo. A sala é considerada hermeticamente fechada com distribuição espacial homogênea de energia interna, com perdas de energia por transmissão, ventilação e infiltração. O sensor de temperatura é modelado como uma esfera de cobre de 1 mm de diâmetro.

Aplicando-se a equação de conservação de energia nos diversos elementos, obtém-se a formulação matemática descrita a seguir. Para o ambiente fechado por m superfícies, tem-se

$$\rho_A c_A V_A \frac{dT_A(t)}{dt} = \sum_{i=1}^m h_{int} A_i [T_{n,i}(t) - T_A(t)] + h_c A_c [T_c(t) - T_A(t)] + (\dot{m}_{inf} + \dot{m}_{vent}) c_{pu} [T_{ext}(t) - T_A(t)] + D(t), \quad (8)$$

onde ρ_A , c_A , V_A , $T_{n,i}(t)$, h_{int} , e A_i são respectivamente a massa específica, o calor específico, o volume, a temperatura da última camada (n) da superfície i , o coeficiente de troca de calor por convecção e a área para troca de calor na superfície i . A variável $T_A(t)$ representa a temperatura do ambiente e $T_c(t)$ a temperatura do aquecedor.

A perturbação $D(t)$ considera o calor latente trocado por infiltração e ventilação, o calor trocado com o exterior através de superfícies de baixa inércia térmica, tais como vidros e portas, além do ganho interno devido a equipamentos, pessoas e iluminação. Esse termo pode ser escrito como:

$$D(t) = \sum_{j=1}^m \frac{T_{eq}(t) - T_A(t)}{R_j} + q_p + q_e + q_l + \dot{m} L \left(\frac{T_{ext}(t) + T_A(t)}{2} \right) (w_{ext}(t) - w_A(t)) \quad (9)$$

onde q_p , q_e e q_l são os ganhos térmicos devido à presença de pessoas, equipamentos e iluminação. A resistência térmica R da j -ésima superfície é dada pela seguinte expressão:

$$R_j = \frac{1}{h_{ext} A_j} + \frac{L_j}{\lambda_j A_j} + \frac{1}{h_{int} A_j} \quad (10)$$

onde A_j é a área da superfície j de baixa capacitância térmica e h_{int} é o coeficiente de troca de calor por convecção com o ar interno. Para a camada k da parede i , obtém-se a equação de balanço de energia:

$$\rho_{k,i} c_{k,i} V_{k,i} \frac{dT_{k,i}(t)}{dt} = K_{k+1,i} A_i [T_{k+1,i}(t) - T_{k,i}(t)] - K_{k,i} A_i [T_{k,i}(t) - T_{k-1,i}(t)] \quad (11)$$

Em relação à avaliação da condutância térmica K , utiliza-se a seguinte expressão baseada em médias harmônicas:

$$K_{k,i} = \frac{1}{(L_{k-1,i} / 2) / \lambda_{k-1,i} + (L_{k,i} / 2) / \lambda_{k,i}} \quad (12)$$

onde $L_{k,i}$ denota a espessura da camada k e $\lambda_{k,i}$ é a sua condutividade térmica. A condição de contorno para a camada externa ($k=1$) é dada por:

$$K_{1,i} (T_{2,i} - T_{1,i}) = h_{ext} (T_{1,i} - T_{eq}) + q_r(t) - \varepsilon_{ceil} R_{LW} \quad (13)$$

onde $(\varepsilon)_{ceil}$ representa a emissividade da laje. A radiação por onda longa proveniente de outras superfícies vizinhas não foi considerada. As cargas de infiltração foram obtidas da ASHRAE (1993). A variável T_{eq} representa a temperatura equivalente (Ar-Sol) dada pela seguinte expressão:

$$T_{eq} = T_{ext} + \frac{\alpha I}{h_{ext}} \quad (14)$$

onde α é a absorvidade da superfície externa da parede; I , a radiação solar total (direta mais difusa) e h_{ext} é o coeficiente externo de troca de calor por convecção. Para a camada interna ($k=n$) da i -ésima parede, pode-se escrever a seguinte equação como condição de contorno:

$$K_{n,i} A_i (T_{n-1,i} - T_{n,i}) = h_{int} A_i (T_{n,i}(t) - T_A(t)) + \sigma \varepsilon_c A_c F_{s,c-i} [T_{n,i}^4(t) - T_c^4(t)] + \sigma \varepsilon_i A_i \sum_{j=1}^m F_{s,j-i} [T_{n,i}^4(t) - T_{n,j}^4(t)] \quad (15)$$

onde σ , ε e F_s representam a constante de Stefan-Boltzmann, a emissividade e o fator de forma. Entretanto, para o piso ($i=5$), considera-se para $k=1$, uma temperatura de solo constante a uma profundidade de 5m, aplicando-se portanto a condição de contorno de Dirichlet. O aquecedor elétrico é modelado globalmente como:

$$\rho_c c_c V_c \frac{dT_c(t)}{dt} = Q(t) - h_c A_c [T_c(t) - T_A(t)] - \sigma \varepsilon A_c \sum_{i=1}^m F_{s,c-i} [T_c^4(t) - T_{n,i}^4(t)] \quad (16)$$

onde $Q(t)$ é a potência térmica gerada internamente pelo aquecedor através de efeito Joule, ρ_c é a densidade do aquecedor, c_c , a massa específica, V_c , o calor específico, h_c , o volume do óleo do aquecedor, o coeficiente de troca de calor por convecção entre o aquecedor e o ar e A_c consiste da área para troca de calor. Para a temperatura $T_s(t)$ do sensor do sistema de aquecimento, tem-se:

$$\rho_s c_s V_s \frac{dT_s(t)}{dt} = h_s A_s [T_A(t) - T_s(t)] \quad (17)$$

onde ρ_s , c_s , V_s , h_s e A_s são a massa específica, o calor específico, o volume, o coeficiente de troca de calor por convecção e a área para troca de calor do sensor, respectivamente. Em termos de balanço de massa de vapor d'água, leva-se em conta ventilação, infiltração e geração interna proveniente de equipamentos e de respiração de ocupantes. Assim, obtém-se a formulação global:

$$\rho_{air} V_{air} \frac{dW_{int}}{dt} = (\dot{m}_{inf} + \dot{m}_{vent})(W_{ext} - W_{int}) + \dot{m}_b + \dot{m}_{ger} \quad (18)$$

onde \dot{m}_{inf} é o fluxo de ar por infiltração (kg/s), \dot{m}_{vent} consiste do fluxo de ar por ventilação (kg/s), W_{ext} trata-se da umidade absoluta externa (kg de água/kg de ar seco), W_{int} é a umidade absoluta interna (kg de água/kg de ar seco), \dot{m}_b é o vapor gerado pela presença da respiração de ocupantes (kg/s), \dot{m}_{ger} representa a taxa de geração interna de vapor d'água (kg/s), ρ_{air} é a massa específica de ar seco (kg de ar seco /s) e V_{air} é o volume da sala (m³). O valor do fluxo de vapor de respiração pode ser calculado pelas correlações da ASHRAE (1993) em função da temperatura e umidade absoluta da sala e atividade física.

4. Resultados de simulação

No contexto de conforto térmico, muitas vezes não é necessária a regulação da temperatura e umidade de um ambiente em um valor determinado. Uma faixa de valores admissíveis para estas variáveis é suficiente para criar a sensação de conforto térmico (Fanger, 1974). Estes limites são definidos pelo usuário e/ou pela aplicação. Sob o ponto de vista econômico e, na maioria dos casos, é melhor operar dentro desta faixa de temperatura e umidade economizando energia que obter um erro nulo em regime permanente para a temperatura ambiente (Oliveira *et al.*, 2003a). Neste estudo de caso, a análise do desempenho higrotérmico do edifício é realizada pela execução do modelo dinâmico que rege o sistema aliado ao algoritmo de controle PI nebuloso em ambiente computacional Matlab/Simulink do Asteca (veja detalhes na Fig. 5). Os parâmetros da simulação para o sistema térmico do edifício são apresentados na Tab. 2.

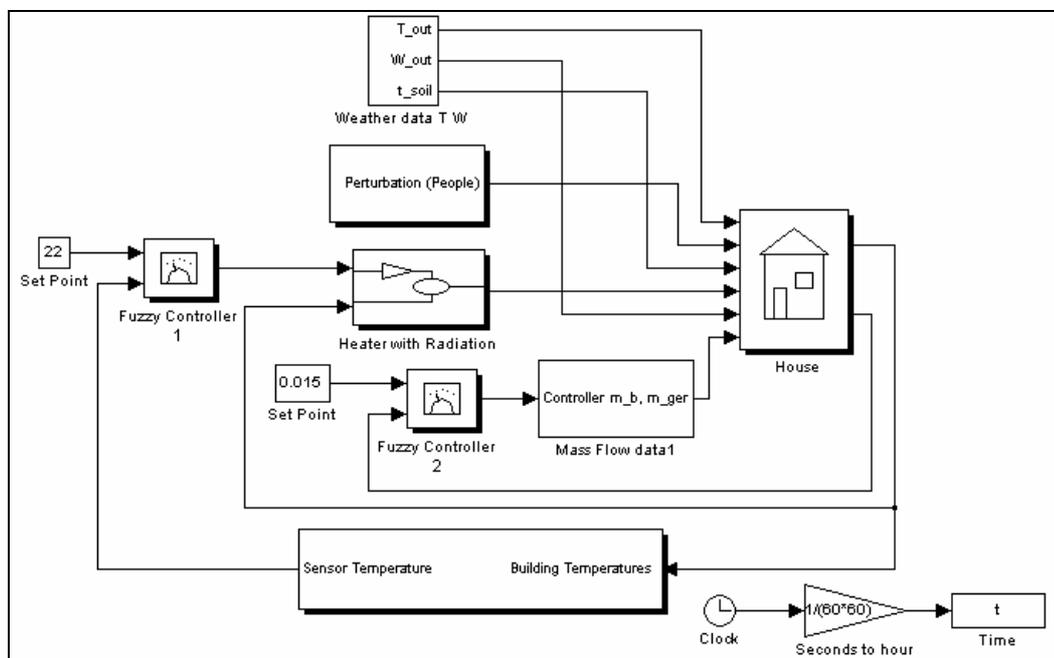


Figura 5. Esquema de sistema higrotérmico desenvolvido em ambiente Asteca para aplicação do controlador PI nebuloso.

Tabela 2: Dimensões e propriedades térmicas do sistema.

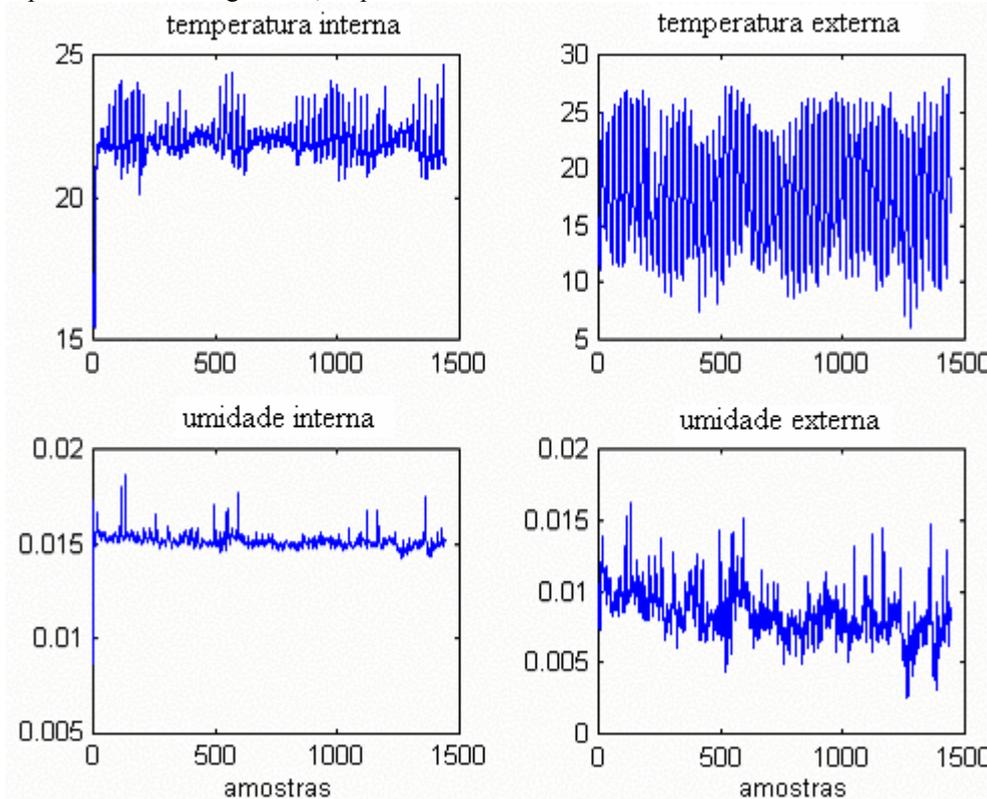
item	ρ (kg/m ³)	c (J/kg-K)	λ (W/m-K)	H (W/m ² -K)	item	A (m ²)	L (cm)	V (m ³)
aquecedor (c)	884,1	1909	---	5,0	aquecedor (c)	5	---	0,002
quarto (A)	1,16	1007	---	5,0	quarto (A)	25*	---	62,50
sensor (s)	8933	385	---	5,0	sensor (s)	$1,26 \times 10^{-5}$	0,1	$4,2 \times 10^{-9}$
paredes e teto	2050	950	1,920	5,0	paredes e teto	12,5	2	0,25
	1900	920	0,985			12,5	10	1,25
	2050	950	1,920			12,5	2	0,25
piso	2050	1840	0,520	5,0		25	20	5,00
	998	900	1,400			25	250	62,50
	550	2385	0,200			25	10	2,50

* áreas de superfície do piso e do teto.

Uma temperatura de referência (valor desejado ou *set point*) de 22°C e fluxo de massa (umidade) de 0,015 kg/s são adotados para análise dos controladores PI nebuloso. Este fluxo de massa está de acordo com padrões brasileiros para um quarto residencial com 2 pessoas dentro. Em relação às propriedades de umidade do sistema adotou-se um fluxo de vapor de água médio devido à respiração dos ocupantes da edificação, taxa de geração de vapor de água interno médio e umidificador de 3×10^{-4} kg/s, 3×10^{-4} kg/s e 0,05 kg/m³, respectivamente.

As simulações para análise higrotérmica foram realizadas para um período de 3 meses, adotando-se dois estudo de casos para o período de inverno entre junho e agosto para as cidades de Brasília e Curitiba. Neste contexto, os dados da biblioteca de climas externos do ambiente Astecca, que lida com dados climáticos de temperatura e umidade de várias cidades brasileiras, coletados durante o período de um ano, foram adotados. O período de amostragem adotado é 100 segundos.

O controlador PI nebuloso para a temperatura foi sintonizado para os seguintes fatores de escala: $k_e = 0,05$, $k_{\Delta e} = 12,75$ e $k_u = 0,0515$; e ao controlador PI nebuloso para a umidade foi projetado para $k_e = 0,0000001$, $k_{\Delta e} = 16$ e $k_u = 1,2$. Os mesmos fatores de escala foram adotados para Brasília e Curitiba. A sintonia dos fatores de escala foi realizada baseada em uma otimização por evolução diferencial (Storn, 1997). Os resultados de controle PI nebuloso para Brasília e Curitiba são apresentados nas Figs. 6 e 7, respectivamente.



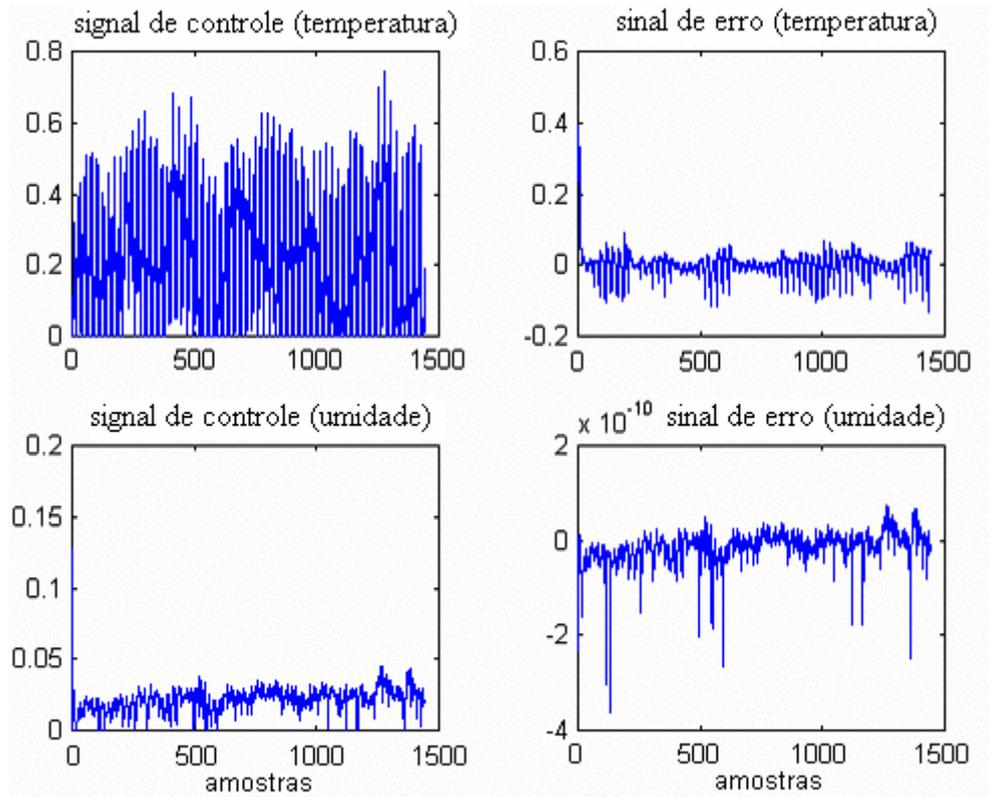
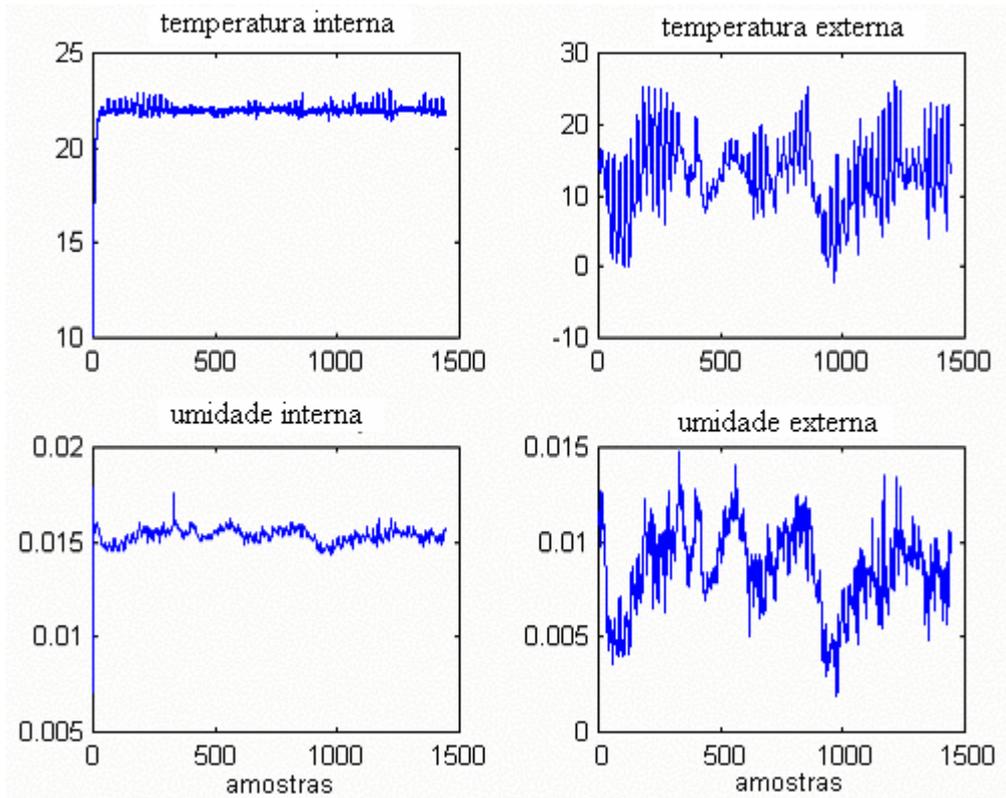


Figura 6. Resultados de controle PI nebuloso para Brasília para o período entre junho e agosto.



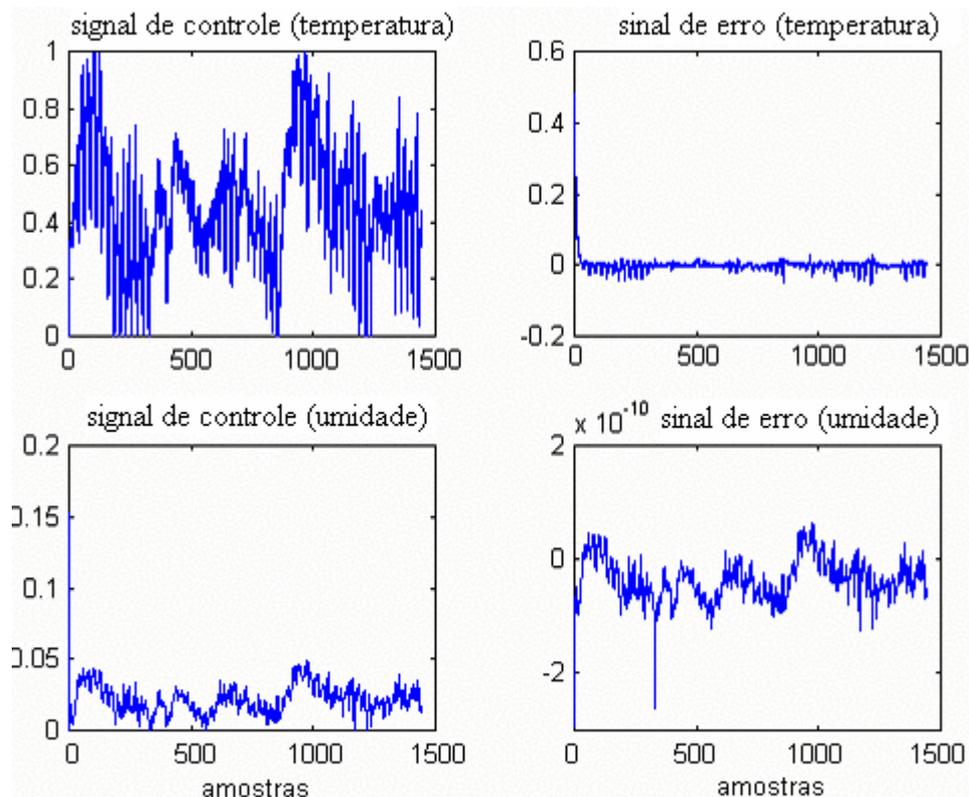


Figura 7. Resultados de controle PI nebuloso para Curitiba para o período entre junho e agosto.

Nota-se pela figura 6 que o controlador PI nebuloso manteve um erro aceitável em relação ao valor de referência de 22°C. O erro médio de temperatura interna neste caso foi de -0,0101 e o controlador manteve o sistema com somente 7,14% do tempo total utilizando com um nível de potência disponível (estipulado em 15 KW) maior que 50%, isto é, 7,5 KW. O consumo total de energia foi de 322,66 KWh e deve-se mencionar que em 47,97% do tempo a potência disponível esteve em nível menor ou igual a 20%. O efeito da ação de controle pode ser resumido nos valores de $u(t)$ com [média,máximo, desvio padrão] = [0,2241 0,7448 0,1827] % da potência máxima disponível de 15 KW. Quanto a umidade (ver figura 6), o erro médio da saída desejada (0,015 kg/s) em relação a obtida foi $-1,3165 \times 10^{-4}$. No estudo de caso de Brasília, a ação de controle $u(t)$ tem valor médio e máximo de 0,0215 e 0,1273, respectivamente.

O desempenho do controlador PI nebuloso, em relação a variável temperatura interna, para Curitiba foi bem mais preciso com erro médio de -0,0094 que para Brasília conforme apresentado na figura 7. No entanto, o valor médio de ação de controle foi de 0,4612% da potência máxima disponível, com desvio padrão de 20,66%. Neste caso, em 11,46% do tempo total o controlador utilizou mais de 70% da potência total disponível. O consumo total de energia foi de 664,07 KWh, um valor mais alto que o de Brasília, pois Curitiba é uma cidade mais fria nos meses de junho a agosto que Brasília. O desempenho em relação à umidade de Curitiba ficou com valores médios, máximos e desvio padrão de ação de controle em 0,0219, 0,1518 e 0,0094. O erro médio de umidade foi de $-3,4537 \times 10^{-4}$.

5. Conclusão

No contexto de sistemas dinâmicos, os sistemas de aquecimento e umidificação 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 (Mendes *et al.*, 2002). Além disso, existem restrições severas em relação a amplitude e a variação do sinal de controle, isto é, os limites relacionados com a potência disponível para aquecer o ambiente. Estas características citadas, juntamente com a necessidade de controle das condições de conforto térmico da temperatura e umidade do ambiente, da redução da amplitude e quantidade dos picos de potência requerida pelo sistema, justificam a utilização de algoritmos avançados de controle, a citar os controladores nebulosos.

Entre as vantagens dos controladores nebulosos sobre os controladores convencionais, PID clássico e *on-off*, têm-se: (i) não necessitam do modelo matemático do processo; (ii) podem trabalhar com entradas imprecisas, (iii) lidam com processos com características de comportamento não-linear, elevada ordem e atraso de transporte, e (iv) possibilitam a implementação do conhecimento e experiência de especialistas usando regras linguísticas.

O projeto de controladores nebulosos já uma realidade no meio industrial, a citar as empresas Eurotherm, Yokogawa, Fuji, Omron, Coulton Instrument, Status Instruments, entre outras, que usam concepções de sintonia de

controladores PID baseados em sistemas nebulosos, principalmente para melhorar o desempenho quanto a requisitos de sobre-elevação (Tomkins, 1995; Tinham, 1995).

Neste artigo, a meta é apresentar o projeto e a análise de desempenho de um controlador PI nebuloso para o controle de um sistema de climatização de uma edificação. Os resultados obtidos mostraram a robustez dos controladores PI nebulosos analisados no seguimento de referência de temperatura e umidade internas desejadas para a edificação. Os futuros trabalhos para sistemas térmicos visam conceber algoritmos evolucionários para otimização dos fatores de escala, funções de pertinência e base de regras do PI nebuloso avaliado neste artigo.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Projeto Ref. 551461/2001-2) pelas bolsas concedidas ao grupo de pesquisa.

7. Referências

- Albertos, P., 1992, "Fuzzy controllers", Application of artificial intelligence in process control, Boullart, L., Krijgsman, A., Vingerhoeds, R. A. (eds.), Pergamon Press, pp. 343-367.
- ASHRAE Handbook-Fundamentals, 1993, Atlanta: ASHRAE.
- Åström, K. J., Hägglund, T., 1995, "PID controllers: theory, design, and tuning", 2nd ed., Research Triangle Park, ISA.
- Fanger, P. O., 1974, "Thermal comfort", McGraw-Hill Inc., NY, USA.
- Gotschaik, K., Nagy, L., Farkas, I., 2003, "Improved climate control for potato stores by fuzzy controllers", Computers and Electronics in Agriculture, vol. 40, pp. 127-140.
- Isermann, R., 1998, "On fuzzy logic applications for automatic control, supervision, and fault diagnosis", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics, vol. 28, no. 2, pp. 221-235.
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G. S., Kalaitzakis, K., 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.
- Mamdani, E., Assilian, S., 1975, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", International Journal of Man-Machine Studies, vol. 7, no. 1, pp. 1-13.
- Manish, G., Woo, P.-Y., 1996, "Efficiency of fuzzy and adaptive fuzzy controllers relative to PID controller in temperature control", Proceedings of the IEEE Int. Symposium on Intelligent Control, Dearborn, MI, pp. 55-60.
- Mann, G. K. I., Hu, B. -G., Gosine, R. G., 1999, "Analysis of direct action fuzzy PID controller structures", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics, vol. 29, no. 3, pp. 371-388.
- Mendes, N., Oliveira, G. H. C.; Araújo, H. X., 2002, "The use of matlab/simulink to evaluate building heating processes", Proceedings of ESDA, 6th Biennial Conf. on Eng. Systems Design and Analysis, Istanbul, Turkey.
- Oliveira, G. H. C., Coelho, L. S., Araújo, H. X., Mendes, N., 2003a, "Using fuzzy logic in heating control systems", Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, AJTEC'03, Hawaii, HI, USA.
- Oliveira, G. H. C., Araújo, H. X., Mendes, N., Coelho, L. S., 2003b, "Ambiente para simulação de sistemas de controle em edificações — parte 2: descrição matemática do conjunto ambiente-climatizador e exemplo de simulação", Anais do VII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) e III Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações (COTEDI).
- Pang, G. K. H., Mesbah, S. A., 1998, "Design of bang-bang controller based on a fuzzy-neuro approach: application to a heating system", Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 22, pp. 51-85.
- Sierakowski, C. A., Araújo, H. X., Oliveira, G. H. C., Mendes, N., Coelho, L. S., Mendonça, K., Santos, G., 2004, "Astecca: programa para análise térmica e de estratégias de controle para condicionamento de ambientes", Mercofrio 2004, Curitiba, PR.
- Storn, R., 1997, "Differential evolution — a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", Journal of Global Optimization, vol. 11, no. 4, pp. 341-359, 1997.
- Talebi-Daryani, R., 2001, "Application of fuzzy logic for control of heating, chilling, and air conditioning system", Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies, Zilouchian, A. & Jamshidi, M., CRC Press, Boca Raton, USA, pp. 261-290.
- Tang, K. L., Mulholland, R. J., 1987, "Comparing fuzzy logic with classical controller designs", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 17, no. 6, pp. 1085-1087.
- Tinham, B., 1995, "Temperature control getting fuzzy?", C&I, August, pp. 23-24.
- Tompkins, P., 1995, "Temperature controllers", C&I, September, pp. 27-30.
- Yen, J., 1999, "Fuzzy logic — a modern perspective", IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 153-165.
- Ying-guo, P., Hua-guang, Z., Bien, Z., 1998, "A simple fuzzy adaptive control method and application in HVAC", IEEE World Cong. Comp. Intelligence, IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, Anchorage, USA, vol. 1, pp. 528-532.

FUZZY PI CONTROL DESIGN APPLIED TO A CLIMATIZATION SYSTEM OF A BUILDING

Leandro dos Santos Coelho
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Rua Imaculada Conceição, 1155 — Bairro Prado Velho — Curitiba — PR
leandro.coelho@pucpr.br

Humberto de Xavier Araújo
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Rua Imaculada Conceição, 1155 — Bairro Prado Velho — Curitiba — PR
humberto.araujo@pucpr.br

Gustavo Henrique da Costa Oliveira
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Rua Imaculada Conceição, 1155 — Bairro Prado Velho — Curitiba — PR
gustavo.oliveira@pucpr.br

Nathan Mendes
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Laboratório de Sistemas Térmicos
Rua Imaculada Conceição, 1155 — Bairro Prado Velho — Curitiba — PR
nathan.mendes@pucpr.br

Abstract

The aim of this paper is to present and evaluate a fuzzy PI (proportional and integral) control design applied to a HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) system of a building. The simulation environment is developed using the Astecca environment with Matlab/Simulink software, to calculate the building's response to the control signals for adjustment of desired internal air temperature and internal relative humidity. Study cases for two Brazilian cities are developed and evaluated with fuzzy PI control. Simulation results from application of fuzzy controller are presented. The results show that the proposed fuzzy control strategy makes it possible to maximize the energy economy of HVAC system.

Keywords: simulation tool, thermal systems, fuzzy control, control systems.