

CONTROLE PI BASEADO EM OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADO A UM SISTEMA DE CONFORTO TÉRMICO

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. Este artigo apresenta o projeto de um sistema de controle aplicado a um processo do aquecimento de uma edificação. Uma aproximação do comportamento dinâmico do sistema é usada para modelar a temperatura de ar do quarto e um modelo multicamadas para o envelope do edifício. O controle de temperatura é realizado por um controlador PI (proporcional-integral). Desde que o modelo matemático seja de alta ordem e não-linear, as estratégias clássicas para a sintonia do PI podem ser complexas de aplicar. Neste estudo de caso, propõe-se o uso de algoritmos genéticos para otimizar os parâmetros do controlador PI. Os algoritmos genéticos são técnicas de busca e otimização da inteligência artificial que derivam sua inspiração da seleção natural biológica e da genética. Os resultados de simulação da aplicação ao controlador do PI com projeto através de algoritmo genético, para um processo de aquecimento do edifício são apresentados e demonstram as potencialidades desta abordagem de projeto.

Palavras chave: sistemas térmicos, controle de sistemas, otimização, algoritmos genéticos.

1. Introdução

A difusão de novas técnicas construtivas, de soluções alternativas de obtenção de energia e de abordagens para obtenção de conforto térmico tem despertado interesse crescente nos últimos anos de engenheiros e empresários da construção civil. Entretanto, apesar dos avanços realizados na tecnologia de microprocessadores e no seu impacto no desenvolvimento de novas metodologias de controle para aplicações de aquecimento de edifícios que visam melhorando sua eficiência de energia, o processo de operar um sistema de HVAC (*Heating, Ventilating and Air-Conditioning*) em edifícios comerciais e industriais é ainda um procedimento ineficiente e com alto consumo de energia (Arguello-Serrano & Velez-Reyes, 1999).

A concepção do projeto de algoritmos de controle de processos de aquecimento de edificações é um tópico da pesquisa que tem recebido uma considerável atenção nas últimas duas décadas (Wang & Jin, 2000; Kim *et al.*, 2001). As técnicas de controle clássico incluindo-se os controladores *on-off*, proporcional-integral (PI), e proporcional-integral-derivativo (PID) são muito utilizadas no meio industrial e comercial, ou seja, apesar do crescente desenvolvimento na teoria de controle, a maioria de processos industriais ainda é controlada por controladores do tipo PI ou PID.

A popularidade do controle do PI ou PID pode ser atribuída a: (i) sua simplicidade (em termos do projeto e do ponto de vista dos poucos parâmetros que necessitam ser ajustados em relação a outros controladores mais avançados), (ii) sua vasta aplicabilidade, e (iii) seu desempenho robusto em uma variedade de diferentes processos em operação no meio industrial. A sintonia dos parâmetros do controlador PID (isto é, ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo) usando técnicas tradicionais, baseia-se usualmente em métodos no domínio da frequência, Ziegler-Nichols e heurísticos de tentativa e erro, como refinamentos para satisfazer as condições de projeto (Åström & Hägglund, 1995; Cominos & Munro, 2002).

Entretanto, os controladores PI e PIDs atuais possuem uma desvantagem quando da necessidade de um novo ajuste sempre que os processos estão sujeitos a algum tipo do distúrbio ou quando os processos apresentam complexidades. Assim, nos últimos anos, um desenvolvimento significativo tem sido estabelecido na área do controle de sistemas visando a otimização de parâmetros de controladores, tanto clássicos quanto avançados, a

fim de assegurar comportamentos dinâmico servo e regulatório adequado para o controle de processos em malha fechada (Wang & Kwok, 1993; Coelho & Coelho, 1998). Recentemente, a combinação das vantagens da informática, de técnicas modernas de controle de processos, e da teoria da inteligência artificial têm motivado o desenvolvimento de metodologias na área de controle inteligente. Neste artigo, o controle de temperatura é executado por um projeto do controle do tipo PI baseado em otimização, esta realizada por uma metodologia inteligente denominada algoritmos genéticos (AGs).

O artigo é organizado da seguinte maneira. Os conceitos básicos dos AGs são apresentados na seção 2. Na seção 3, o detalhamento do procedimento de otimização do controlador PI baseada em AGs é apresentada. A descrição do estudo de caso de um processo térmico de aquecimento é apresentada na seção 4. Os resultados de simulação e a conclusão são apresentados e discutidos nas seções 5 e 6, respectivamente.

2. Descrição do sistema térmico

Esta seção apresenta um modelo dinâmico para a análise de desempenho térmico de um edifício (Mendes *et al.*, 2002), este usado na aplicação de controle do tipo PI. 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

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

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:

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

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:

$$R_j = \frac{1}{h_{ext} A_j} + \frac{L_j}{\lambda_j A_j} + \frac{1}{h_{int} A_j} \quad (3)$$

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:

$$\rho_{k,i} c_{k,i} V_{k,i} \frac{dT_{k,i}(t)}{dt} = K_{k+1,i} A_i [T_{k+1,i}(t) - T_{k,i}(t)] - K_{k,i} A_i [T_{k,i}(t) - T_{k-1,i}(t)] \quad (4)$$

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

$$K_{k,i} = \frac{1}{(L_{k-1,i} / 2) / \lambda_{k-1,i} + (L_{k,i} / 2) / \lambda_{k,i}} \quad (5)$$

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:

$$K_{1,i} (T_{2,i} - T_{1,i}) = h_{ext} (T_{1,i} - T_{eq}) + q_r(t) - \varepsilon_{ceil} R_{LW} \quad (6)$$

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:

$$T_{eq} = T_{ext} + \frac{\alpha I}{h_{ext}} \quad (7)$$

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:

$$K_{n,i} A_i (T_{n-1,i} - T_{n,i}) = h_{int} A_i (T_{n,i}(t) - T_A(t)) + \sigma \varepsilon_c A_c F_{s,c-i} [T_{n,i}^4(t) - T_c^4(t)] + \sigma \varepsilon_i A_i \sum_{j=1}^m F_{s,j-i} [T_{n,i}^4(t) - T_{n,j}^4(t)] \quad (8)$$

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:

$$\rho_c c_c V_c \frac{dT_c(t)}{dt} = Q(t) - h_c A_c [T_c(t) - T_A(t)] - \sigma \varepsilon_c A_c \sum_{i=1}^m F_{s,c-i} [T_c^4(t) - T_{n,i}^4(t)] \quad (9)$$

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:

$$\rho_s c_s V_s \frac{dT_s(t)}{dt} = h_s A_s [T_A(t) - T_s(t)] \quad (10)$$

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:

$$\rho_{air} V_{air} \frac{dW_{int}}{dt} = (\dot{m}_{inf} + \dot{m}_{vent}) (W_{ext} - W_{int}) + \dot{m}_b + \dot{m}_{ger} \quad (11)$$

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 (m^3). 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.

3. Algoritmos genéticos

O paradigma computacional da computação evolutiva ou evolucionária (CE) imita um modelo rudimentar e simplificado do modelo da natureza como um procedimento adaptativo de busca e otimização que possibilite implementações computacionais. A CE sugere um mecanismo em que uma população de indivíduos (soluções) visa melhorar, em média, a sua adequação com relação ao ambiente, ou seja, o seu desempenho geral com respeito a solução de um dado problema. A CE engloba um número crescente de metodologias, das quais as mais relevantes são: algoritmos genéticos, programação evolucionária, estratégias evolutivas, sistemas classificadores e programação genética.

Os AGs foram desenvolvidos por Holland (1975) na University of Michigan. Os AGs são técnicas não-determinísticas de busca, otimização e aprendizagem de máquina, que manipulam um espaço de soluções

potenciais, utilizando mecanismos inspirados nas teorias de seleção natural de C. Darwin e na genética de G. Mendel. O pseudocódigo das etapas dos AG são resumidos na Fig. 1. O procedimento básico de otimização por AGs utiliza três operadores básicos: seleção, cruzamento (*crossover*) e mutação. Os AGs com representação binária são usualmente implementados, conforme as seguintes etapas (Goldberg, 1989):

- (i) a população inicial de parâmetros compreende P soluções. Cada uma das soluções consiste de vetores $x_i \in \{0,1\}$ (representação canônica ou binária). Estes parâmetros são iniciados de acordo com uma distribuição uniforme;
- (ii) classificar cada solução x_i , $i=[1,P]$, com relação ao cálculo da função de adequabilidade (*fitness*), ou seja, avalia-se o grau de adaptação (função objetivo ou custo) de cada indivíduo da população em relação ao problema (usando-se uma decodificação de base binária para base decimal);
- (iii) selecionar os indivíduos mais aptos de acordo com a estratégia de seleção;
- (iv) aplicar os operadores genéticos de cruzamento e mutação;
- (v) gerar uma nova população; e
- (vi) repetir os passos (ii) a (v) até que uma condição de parada seja satisfeita.

```
geração  $f \leftarrow 0$ 
geração da população inicial ( $P(f)$ )
avaliação da aptidão da população ( $P(f)$ )
enquanto o critério de parada não é atingido
{
   $f \leftarrow f + 1$ 
   $P(f) = \text{seleção}(P(f-1))$ 
  cruzamento ( $P(f)$ )
  mutação ( $P(f)$ )
  avaliação da aptidão da população ( $P(f)$ )
}
```

Figura 1. Pseudocódigo do ciclo de otimização por AGs.

O operador de seleção emprega o princípio de sobrevivência dos indivíduos mais aptos, por meio de uma metáfora aos processos de reprodução assexuada e seleção natural, de acordo com o grau de adaptação do indivíduo. Neste artigo é utilizado o operador de seleção por roleta. O operador genético de cruzamento é responsável pela troca de material genético entre os indivíduos com probabilidade de reproduzirem mais freqüentemente “bons” indivíduos, ou seja, mais aptos ao ambiente. O operador de mutação implica na modificação do valor de cada gene de um indivíduo e visa restaurar o material genético perdido ou não explorado em uma população visando prevenir a convergência prematura do AG para soluções sub-ótimas.

A definição dos parâmetros intrínsecos aos AGs geralmente é usualmente heurística, tais como: tamanho da população, tamanho da estrutura dos indivíduos (cromossomos) e as probabilidades de utilização dos operadores genéticos. Apesar de intensas pesquisas na área, principalmente com o emprego de métodos de adaptação dinâmica dos parâmetros de controle dos AGs, não existe uma regra determinística para o projetista estipular o tamanho da população e probabilidade dos operadores genéticos de modo a obter-se uma relação promissora quanto aos tópicos de diversidade na população e a capacidade de convergência dos AGs. A literatura menciona que as configurações adotadas em AGs (representação binária) utilizam usualmente o tamanho da população entre 30 e 200, probabilidade de cruzamento entre 0,50 e 1,00 e probabilidade de mutação entre 0,001 e 0,05 (Srinivas & Patnaik, 1994).

Os AGs são técnicas robustas e eficientes em espaços de procura irregulares, multidimensionais e complexos, e caracterizam-se por (Goldberg, 1989): (i) operam em uma população de pontos; (ii) não requerem derivadas; (iii) trabalham com a codificação de seu conjunto de parâmetros; (iv) realizam transições probabilísticas, em vez de regras determinísticas; (v) necessitam apenas de informação sobre o valor de uma função objetivo para cada indivíduo da população.

4. Controle PI usando otimização por algoritmos genéticos

O planejamento relacionado ao conforto térmico e eficiência energética de edificações deve abranger conceitos arquitetônicos, estruturais e de sistemas de controle de temperatura de forma obter-se uma edificação apropriada para atender a diversos critérios previamente estabelecidos de sustentabilidade, racionalização energética e impacto ambiental mínimo.

Neste contexto, a contribuição deste artigo é à aplicação de um sistema de controle de temperatura de uma edificação, este baseado em teorias de controle PID e algoritmos genéticos, o que implica na racionalização do uso dos recursos naturais para climatização e uma conseqüente redução de consumo energético da edificação.

O algoritmo de controle PI é simples e robusto para o controle de processos com comportamento dinâmico de primeira e segunda ordem e/ou mesmo processos de ordem mais elevada. Um controlador do PI é tipicamente descrito pela equação:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (12)$$

onde $e(t) = y_{sp}(t) - y(t)$ é erro do sistema, isto é, a diferença entre a valor do sinal de referência (desejado), $y_{sp}(t)$, e o sinal de saída do processo $y(t)$; $u(t)$ é a variável do sinal de controle, K_p é o ganho proporcional e T_i é a constante de tempo integral. Alternativamente, a equação (12) pode ser escrita de forma que:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (13)$$

onde $K_i = K_p / T_i$ é a constante de ganho integral. O problema de sintonia consiste na determinação dos valores dos parâmetros do controlador. Em geral, não é uma tarefa fácil satisfazer ao mesmo tempo a diferentes especificações de projeto de um sistema de controle do tipo PI. Geralmente um método de ajuste tradicional do controlador do PI requer que os usuários do controlador possuam conhecimento do sistema de controle e experiência quanto a sua configuração e ajuste. O procedimento de sintonia geralmente é realizado heurísticamente por métodos de tentativa e erro, e esta tarefa pode ser tediosa e consumir muito tempo.

Conseqüentemente há uma necessidade para alguma aproximação alternativa para obtenção de um determinado nível da automação do procedimento de sintonia do controlador que não requiera e não requereria dos usuários, geralmente com maior formação prática que teórica, ter muito conhecimento do domínio. Neste papel a aproximação alternativa usada para ajustar do PI é o AG, este descrito anteriormente na seção 3 deste artigo.

5. Resultados de simulação

A necessidade fornecer o controle de temperatura dentro dos edifícios para melhorar os níveis do conforto e conseqüente produtividade é desejável. Entretanto, o custo do projeto ou do re-projeto para obtenção dos níveis de conforto desejados tem que economicamente ser avaliado de acordo com as necessidades dos usuários do sistema. Neste estudo de caso, a análise do desempenho térmico do edifício é realizada pela execução dinâmica do modelo dinâmico que rege o sistema aliado ao algoritmo de controle PI em ambiente computacional Matlab/Simulink (veja Fig. 2). Os parâmetros da simulação para o sistema térmico do edifício são apresentados na Tab. 1.

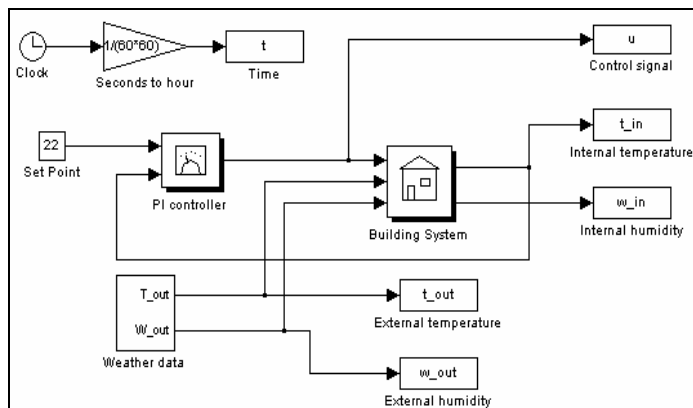


Figura 2. Esquema do sistema de construção usando ambiente Matlab/Simulink.

Tabela 1: Dimensões e propriedades térmicas do sistema.

	ρ (kg/m ³)	c (J/kg-K)	λ (W/m-K)	H (W/m ² -K)
aquecedor (c)	884,1	1909	---	5,0
quarto (A)	1,16	1007	---	5,0
sensor (s)	8933	385	---	5,0
paredes e teto	2050	950	1,920	5,0
	1900	920	0,985	
	2050	950	1,920	
piso	2050	1840	0,520	5,0
	998	900	1,400	
	550	2385	0,200	

	A (m ²)	L (cm)	V (m ³)
aquecedor (c)	5	---	0,002
quarto (A)	25*	---	62,50
sensor (s)	1,26x10 ⁻⁵	0,1	4,2x10 ⁻⁹
paredes e teto	12,5	2	0,25
	12,5	10	1,25
	12,5	2	0,25
	25	20	5,00
	25	250	62,50
	25	10	2,50

* áreas de superfície do piso e do teto.

Antes de aplicar o procedimento de otimização do controlador PI através de um AG, as seguintes decisões devem ser tomadas: (i) a escolha de uma representação dos indivíduos (parâmetros K_p e K_i); (ii) a escolha de uma maneira de gerar a população inicial das soluções; (iii) a escolha da função da avaliação (*fitness*); (iv) a definição de operadores do cruzamento e mutação e de suas probabilidades; (v) a definição o operador da seleção; e (vi) o ajuste do tamanho da população de indivíduos.

Uma observação relevante é que há diversas abordagens apresentadas na literatura sobre o controle dos parâmetros de AGs (Eiben *et al.*, 1999). Entretanto, não existe uma regra determinística para uma configuração “ótima” de um AG. No caso de um tamanho pequeno de população, é mais provável a ocorrência de convergência prematura devido a grande probabilidade da presença de indivíduos demasiadamente dominantes no espaço da solução. Em contrapartida, no caso do tamanho da população ser grande, a complexidade computacional para a aplicação de AG pode ser inviável para determinado tipo de aplicação.

O conjunto de parâmetros da população é codificado em cadeias de *strings* de tamanho finito com 16 bits para a representação binária de cada indivíduo, estes compostos cada um de um vetor composto de dois valores, isto é, K_p e K_i . O espaço de busca dos ganhos controlador são os seguintes: $K_p \in [0;10]$ e $K_i \in [0,0001; 0,1]$. Os parâmetros do AG são selecionados como:

- tamanho de população: 20;
- número de gerações (critério de parada): 20;
- probabilidade de cruzamento: 0,90;
- probabilidade de mutação: 0,01.

Como o AG obtém um conjunto de soluções para o problema (isto é, os ganhos do controlador) em cada geração, necessita-se fornecer uma função de avaliação de modo que permita o cálculo de um valor da aptidão para cada solução. A seguinte função da aptidão (problema de maximização) é adotada neste artigo:

$$J(K_p, K_i) = \frac{k}{1 + \sum_{t=1}^N [y_{sp}(t) - y(t)]^2} \quad (14)$$

onde k é um fator de escala (adotado $k=500$), $y(t)$ é a saída do sistema térmico (temperatura do ar no quarto) e $y_{sp}(t)$ é a temperatura desejada (*setpoint*) para a saída do sistema. O melhor resultado para a otimização do controlador PI baseada em um AG foi com $K_p = 0,9848$ e $K_i = 0,0061$, onde o valor do *fitness* foi $J(K_p, K_i) = 0,7981$. Neste caso, a máxima temperatura do ar do quarto foi 22,69°C com variância de 0,0362°C. O resultado de simulação da melhor sintonia do controlador PI é apresentado em Fig. 3. Na Fig. 3, a evolução da temperatura interna está comparada com a temperatura externa, quando o sistema de aquecimento elétrico descrito pela equação (9) é colocado no quarto.

Neste caso, o controle do aquecedor é realizado pela estratégia do controle de PI. Uma temperatura de referência (valor desejado) de 22°C e fluxo de massa de 0,02 kg/s são adotados. Este fluxo de massa está de acordo com padrões brasileiros para um quarto residencial com 2 pessoas dentro. As simulações de aquecimento são realizadas para um período de 2 dias (48 horas). Este resultado preliminar mostra que o AG é uma ferramenta promissora para o ajuste dos parâmetros do controlador do PI em projetos de sistemas de aquecimento de edificações.

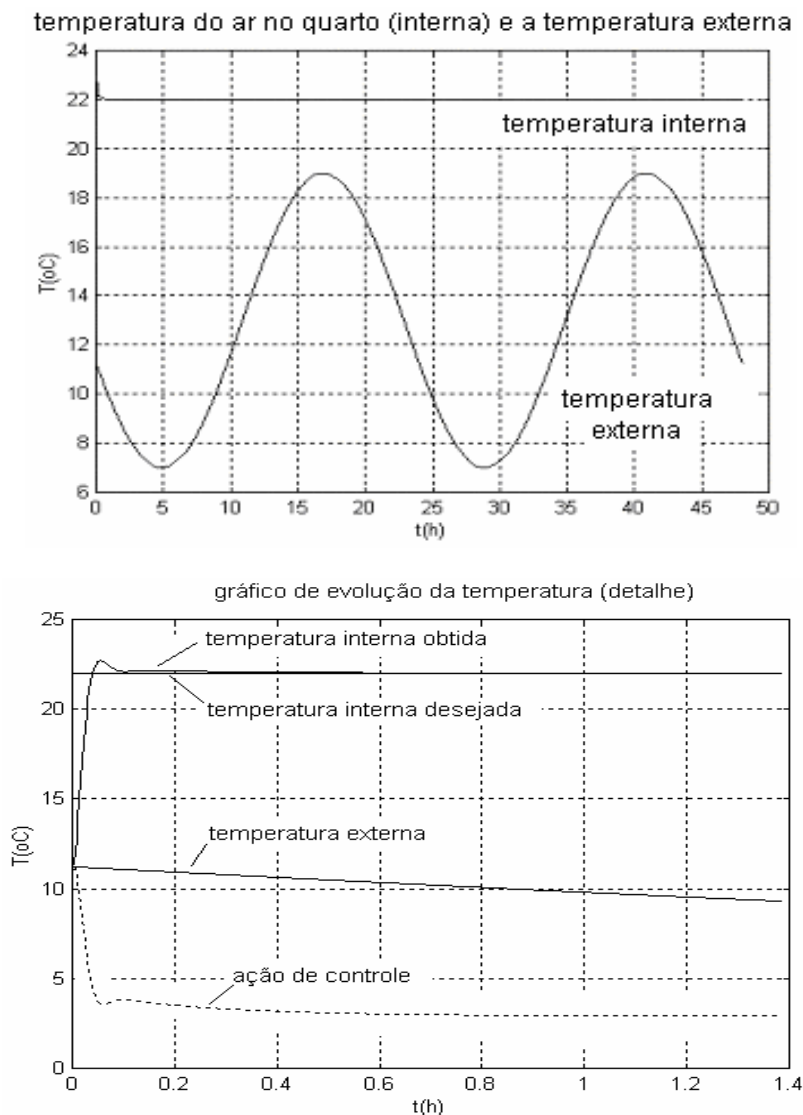


Figura 3. Evolução da temperatura com o sistema de aquecimento controlado por controlador PI com otimização realizada através de AGs.

6. Conclusão

O projeto de controladores para aplicações de sistemas térmicos em edificações é um assunto emergente de investigação por pesquisadores e engenheiros. A necessidade fornecer o controle de fatores climáticos dentro dos edifícios é relevante para a melhoria dos níveis de conforto térmico dos habitantes. Nas últimas décadas, na literatura são apresentados diversos métodos para o projeto de controladores, entre estes vários são para o ajuste ou otimização de controladores PI ou PIDs (Cominos & Munro, 2002).

Apesar do fato que os controladores mais freqüentemente usados na indústria são do tipo PI ou PID, os estudos apresentados na literatura mostram que uma quantidade grande de problemas do controle está causada pelo ajuste inadequado dos parâmetros do PI (Åström & Hägglund, 1995). Neste trabalho, demonstrou-se que a metodologia do controle do PI baseada em otimização por AGs pode ser usada em aplicações de sistemas de aquecimento.

Os AGs são técnicas de otimização que não requerem conhecimento prévio do modelo matemático do processo para sintonia dos ganhos do controlador PI (exceto em aplicações de simulação onde o modelo matemático do processo é controlado por meio de procedimentos de identificação de sistemas).

O AG provou ser robusto e promissor para o ajuste dos ganhos do controlador PI. Entretanto, os AGs não apresentam somente potencialidades. A principal desvantagem do AG é que para cada geração do algoritmo, a população inteira das soluções necessita ser avaliada para o cálculo da função de aptidão (adequação). A outra limitação é que a eficácia de um AG depende do ajuste dos seus componentes, tais como: representação, operadores e probabilidades, além das interações entre eles.

7. Referências

- Arguello-Serrano, B., Velez-Reyes, M., 1999, "Nonlinear control of a heating, ventilating, and air conditioning system with thermal load estimation", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 7, no. 1, pp. 56-63.
- ASHRAE Handbook-Fundamentals, 1993, Atlanta: ASHRAE.
- Åström, K. J., Hägglund, T., 1995, "PID controllers: theory, design, and tuning", 2nd ed., Research Triangle Park, ISA.
- Coelho, L. S., Coelho, A. A. R., 1998, "Computational intelligence in process control: fuzzy, evolutionary, neural, and hybrid approaches", Int. Journal of Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems, vol. 2, no. 2, pp. 80-94.
- Cominos, P., Munro, N., 2002, "PID controllers: recent tuning methods and design to specification", IEE Proceedings- Control Theory and Applications, vol. 149, no. 1, pp. 46-53.
- Eiben, A. E., Hinterding, R., Michalewicz, Z., 1999, "Parameter control in evolutionary algorithms", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 3, no. 2, pp. 124-141.
- Goldberg, D. E., 1989, "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning", Addison-Wesley, MA.
- Holland, J. H., 1975, "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press.
- Kim, T., Kato, S., Murakami, S., 2001, "Indoor cooling/heating load analysis based on coupled simulation of convection, radiation and HVAC control", Building and Environment, vol. 36, pp. 901-908.
- 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. Engineering Systems Design and Analysis, Istanbul, Turkey.
- Srinivas, M., Patnaik, L. M., 1994, "Genetic algorithms: a survey", IEEE Computer, vol. 27, no. 6, pp. 17-26.
- Wang, P., Kwok, D. P., 1993, "Optimal design of PID process controllers based on genetic algorithms", Proceedings of 12th IFAC World Congress, Sydney, Australia, vol. 5, pp. 261-265.
- Wang, S., Jin, X., 2000, "Model-based optimal control of VAV air-conditioning system using genetic algorithm", Building and Environment, vol. 35, pp. 471-487.

PI CONTROL BASED ON OPTIMIZATION BY GENETIC ALGORITHMS APPLIED TO A THERMAL COMFORT SYSTEM

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

This paper presents the design of a control system applied to a building heating process. A lumped approach is used to model the room air temperature and a multi-layer model for the building envelope. Temperature control is realized by a PI (proportional-integral) control. Since the mathematical model is high order and nonlinear, classical strategies for PI tuning can be hardly applied. In this case study, it is proposed the use of genetic algorithm to optimize the parameters of PI controller. Genetic algorithms are search and optimization techniques of artificial intelligence that derive their inspiration from biological natural selection and genetics. Simulation results from application to PI controller optimized by genetic algorithm for a building heating process are presented which demonstrate the potentialities of this design approach.

Keywords: thermal systems, optimization, control systems, genetic algorithms.