

# **O PROBLEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA EM AQUECIMENTO DE EDIFICAÇÕES**

**MENDES N., Dr.; ARAÚJO H.X., Dr. e OLIVEIRA G.H.C., Dr.**

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR/CCET)

Laboratório de Sistemas Térmicos

Laboratório de Automação e Sistemas

80.215-970 - Curitiba/PR - Brasil

e-mail: {nmendes,araujo,oliv}@ccet.pucpr.br

## **RESUMO**

Os sistemas de aquecimento para edificações residenciais são normalmente compostos por resistências elétricas operadas por controladores do tipo liga-desliga, comprometendo, em muitas vezes, o conforto térmico. Pode-se também levar a altas demandas de energia, obrigando concessionárias a ter à disposição uma quantidade elevada de energia, onerando o sistema energético nacional. Devido à complexidade da descrição matemática da termofísica da edificação, devido aos diversos fenômenos não-lineares presentes, elaborou-se um modelo global simplificado, onde consideram-se cargas de transmissão, iluminação, equipamentos e pessoas. Aborda-se duas estratégias de controle: PID e liga-desliga. Analisa-se demanda, consumo de energia e controle de temperatura em função do tipo de controlador.

## **ABSTRACT**

Most of the heating systems in Brazilian residential buildings are electric with on-off controllers so that thermal comfort conditions, in a narrow band, are hardly reached and, in addition, peak loads can be very high what demands a good national energy systems to avoid risks on the energy supply. Due to the complex mathematical formulation to describe the building thermophysics, we developed a simplified lumped model which takes into account thermal loads from conduction, lighting, equipment and people. We analyze the sensitivity of peak loads, energy consumption and indoor air temperature in terms of controller nature (PID and on-off).

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de aquecimento para edificações compostos por resistências elétricas, em geral, não possuem nenhum tipo de controle de temperatura. Quando este existe, limita-se a controladores do tipo liga-desliga. A precisão desta estratégia de controle, entretanto, depende fortemente da inércia térmica da edificação e, em muitos casos, existe uma grande zona morta entre as temperaturas de chaveamento do controlador. Isso resulta em um funcionamento ineficiente sob o ponto de vista de precisão, comprometendo o conforto térmico. Pode-se também levar a altas demandas de energia, obrigando as concessionárias a ter à disposição uma quantidade elevada de energia, o que onera o sistema energético como um todo.

A descrição matemática desses sistemas é complexa, devido aos diversos fenômenos físicos não-lineares e incertezas, tais como: clima externo e ocupação da edificação. Neste contexto, elaborou-se um modelo global dinâmico simplificado, para descrição de uma edificação hermeticamente fechada, onde consideram-se cargas de transmissão, iluminação, equipamentos e pessoas. Os coeficientes de convecção são considerados constantes e adota-se valores de temperatura externa variando senoidalmente, simulando um dia frio em Curitiba/PR.

Analisa-se a sensibilidade do consumo, demanda de energia e controle de temperatura para manutenção das condições de conforto térmico em função do tipo de controlador (on-off e PID). Alguns trabalhos na literatura (Athienitis et al., 1990; Dion et al., 1991) abordam o problema de controle em sistemas de climatização em edificações, propondo técnicas avançadas de controle. Entretanto, neste trabalho privilegiou-se a utilização da estratégia PID devido a sua simplicidade de implementação e ampla aceitação no mercado.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O estudo trata-se de modelar dinamicamente o comportamento térmico de uma sala com um aquecedor elétrico penta-aletado (face de 50x10cm), de potência máxima de 5000 W, cujo fluido circulante é óleo a um volume de 2 litros. A sala é considerada hermeticamente fechada com distribuição espacial homogênea de energia interna, (temperatura -  $T_A$ ) com perdas de energia apenas por transmissão através das paredes. O sensor de temperatura é modelado como uma esfera de cobre de 1cm de diâmetro.

Aplicando-se a equação de conservação de energia no aquecedor, ambiente e sensor, obtém-se as seguintes expressões:

Aquecedor:

$$\rho_c c_c V_c \frac{dT_c}{dt} = Q(t) - h_c A_c (T_c - T_A) \quad (1)$$

Ambiente:

$$\rho_A c_A V_A \frac{dT_A}{dt} = h_A A_A (T_c - T_A) + d(t) \quad (2)$$

Sensor:

$$\rho_s c_s V_s \frac{dT_s}{dt} = h_s A_s (T_A - T_s) \quad (3)$$

onde  $Q(t)$  na equação (1) é a potência térmica gerada através do efeito Joule,  $\rho$  a massa específica,  $c$ , calor específico,  $V$ , volume,  $T(t)$ , temperatura,  $t$ , tempo,  $h$ , coeficiente de convecção térmica,  $A$ , área para troca de calor e  $d(t)$  é a perturbação (pessoas, iluminação, etc.).

A variável controlada é a temperatura do sensor  $T_s(t)$ . Na perturbação  $d(t)$ , considera-se o fluxo de calor perdido para o exterior e o ganho interno devido a equipamentos, pessoas e iluminação. Assumindo-se adicionalmente que a sala está perfeitamente isolada do solo, esse termo pode ser escrito como:

$$d(t) = \frac{T_{ext} - T_{int}}{R} + q_p + q_e + q_I \quad (4)$$

onde  $q_p$ ,  $q_e$  e  $q_I$  são os ganhos térmicos devido à presença de pessoas, equipamentos e iluminação. A resistência térmica  $R$  é dada pela seguinte expressão:

$$R = \frac{1}{h_{ext}(A_t + A_p)} + \frac{L}{k(A_t + A_p)} + \frac{1}{h_{int}(A_t + A_p)} \quad (5)$$

onde  $A_t$  e  $A_p$  são as áreas do teto e da parede. Para a parede considerou-se uma espessura  $L=10$  mm e condutividade  $k = 1$  W/m-K. Para os coeficientes de convecção de calor externo ( $h_{ext}$ ) e interno ( $h_{int}$ ) adotou-se 12 e 5 W/m<sup>2</sup>K. A temperatura externa varia senoidalmente como mostrado na Figura 1. Nesta figura, observa-se que a temperatura mínima durante o dia é atingida às 6 horas da manhã.

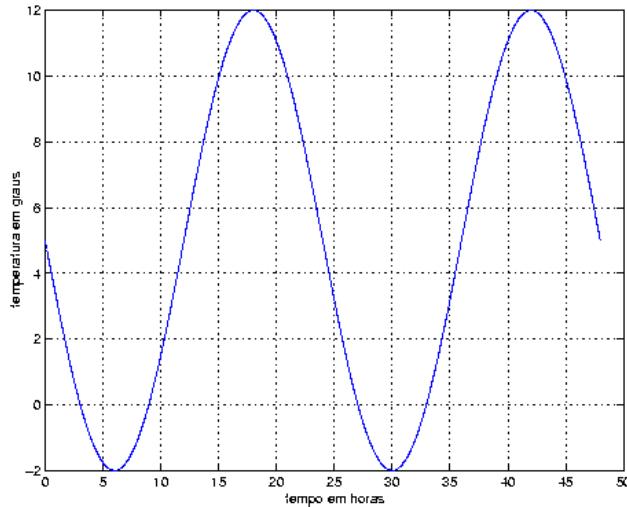


Figura 1: Variação diária da temperatura externa.

A Tabela 1 apresenta dados de propriedades térmicas e geométricas.

Tabela 1: Dados de propriedades térmicas e geométricas.

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (J/kg-K)	h (W/m <sup>2</sup> -K)	V (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )
Aquecedor (c)	884.1	1909	5	0.002	0.5
Ambiente (A)	1.16	1007	5	62.5	0.5
Sensor (s)	8933	385	5	4.18e-6	1.26e-3

Como estudo de caso, considera-se que o espaço é ocupado por 6 pessoas em atividades sedentárias (Calor sensível e latente em atividade sedentária – 117 W – Creder, 1996) e com uma densidade de potência de iluminação de 30 W/m<sup>2</sup> e de equipamento de 6 W/m<sup>2</sup>. Considera-se ainda a presença de pessoas das 8-18h, assim, fora deste período, considera-se que nada esteja ligado.

As equações (1-3) podem ser reescritas como equações de estado na forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_c(t) \\ \dot{T}_a(t) \\ \dot{T}_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{h_c A_c}{\rho_c c_c V_c} & \frac{h_c A_c}{\rho_c c_c V_c} & 0 \\ \frac{h_A A_A}{\rho_A c_A V_A} & -\frac{h_A A_A - R^{-1}}{\rho_A c_A V_A} & 0 \\ 0 & \frac{h_s A_s}{\rho_s c_s V_s} & \frac{-h_s A_s}{\rho_s c_s V_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_c(t) \\ T_a(t) \\ T_s(t) \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho_c c_c V_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R \rho_c c_c V_c} & \frac{1}{\rho_A c_A V_A} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q(t) \\ T_{ext}(t) \\ D(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde  $D(t) = q_p + q_e + q_i$ .

### 3. CONTROLE DE TEMPERATURA

Nesse trabalho, o objetivo é manter a temperatura da sala em um nível desejado visando a melhoria do conforto térmico. Para tanto, duas estratégias de controle são abordadas.

A primeira é do tipo liga-desliga (ou *on-off*). Nesta técnica, o atuador possui somente duas posições fixas, isto é, ligado ou desligado, de acordo com o erro entre a temperatura controlada e seu valor desejado. O sinal de controle é obtido pela seguinte equação:

$$Q(t) = \begin{cases} Q_{max}, & \text{se } e(t) < 0 \\ 0, & \text{se } e(t) \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

onde  $e(t) = T_{desejada}(t) - T_{sensor}(t)$ .

Normalmente, um intervalo através do qual o sinal de erro atuante deve mover-se antes de ocorrer a comutação desejada é denominado intervalo diferencial ou zona morta. Este intervalo é acrescentado ao controlador para impedir a operação excessiva do mecanismo de comutação. Quanto maior o intervalo, menor o número de comutações, porém isto tende a causar um aumento na amplitude das oscilações da temperatura da sala em torno do valor desejado. Assim, o controlador tipo liga-desliga possui como parâmetro de projeto o intervalo diferencial.

A segunda técnica é do tipo PID. Nesta, a lei de controle é composta pela soma de três ações básicas, isto é, as ações proporcional, integral e derivativa. No PID, o sinal de controle é obtido pela seguinte equação:

$$Q(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D de(t)/dt \quad (8)$$

Onde os ganhos  $K_p, K_I, K_D$  são os parâmetros de projeto do controlador e determinam o comportamento dinâmico do sistema.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, compara-se o comportamento do sistema de controle de temperatura da sala usando as estratégias de controle do tipo liga-desliga e PID. O sistema em malha fechada é descrito pelo modelo da sala em conjunto com o controlador.

O controlador liga-desliga foi selecionado de forma a ter um intervalo diferencial de 2°C centrado no valor de conforto de 23°C. O controlador PID foi especificado com ganhos proporcional, integral e derivativo de 550, 0.3 e 50, respectivamente. Esta seleção foi baseada no conhecimento heurístico da relação entre os parâmetros do PID e o comportamento do sistema em malha fechada.

O comportamento da temperatura ambiente, usando-se as duas estratégias de controle, é apresentado na Figura 2. Pode-se observar que as variações em torno da temperatura especificada para conforto térmico (23°C) são muito menores com o PID do que aquelas obtidas com a estratégia de controle do tipo liga-desliga.

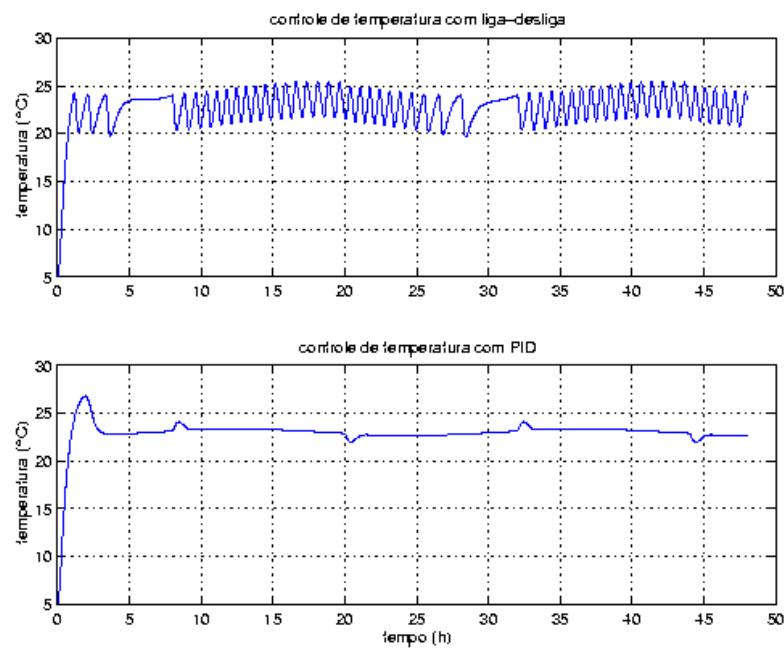


Figura 2: Temperatura do ar ambiente .

Na Figura 3, tem-se o sinal de potência elétrica fornecida ao aquecedor para os dois controladores.

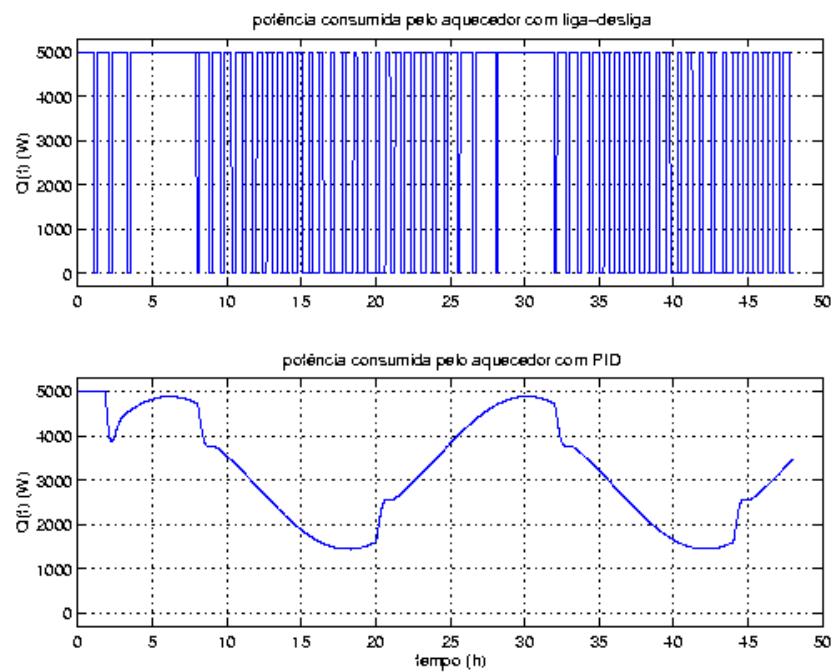


Figura 3: Potência consumida pelo aquecedor

A energia consumida pelo aquecedor durante os dois dias analisados, calculada pela integração desse sinal de potência, é de 151,7 KWh para o liga-desliga e 154,3 KWh para o PID. Apesar de a energia consumida pelo PID ser ligeiramente superior, o sistema com controle liga-desliga opera frequentemente em uma situação de demanda máxima. Outro dado importante é que, devido a sua própria estrutura, o número de comutações do estado do sinal de controle do controlador liga-desliga é elevado, o que pode acarretar a longo prazo em uma diminuição da vida útil do equipamento. Na mesma situação, a variância do sinal de controle do PID é menor.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho o problema de controle de temperatura de uma sala foi abordado tendo como objetivo proporcionar um maior conforto térmico a baixo custo. Duas estratégias de controle foram utilizadas: liga-desliga e PID.

Os resultados da simulação mostraram que o controle do PID diminui a influência das perturbações externas na temperatura ambiente, proporcionando um maior conforto térmico com menor demanda de energia. Além disto, o controle liga-desliga apresenta um número elevado de comutações de chaveamento por unidade de tempo, podendo reduzir a vida útil do equipamento.

Para trabalhos futuros, pretende-se incluir outras cargas térmicas tais como de infiltração, ventilação e insolação dentre outras, levando-se em conta as incertezas de parâmetros e técnicas de controle robusto.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE Handbook-Fundamentals. Atlanta: **ASHRAE**, 1993.
- Athienitis A.K., Stylianou M. and Shou J., A Methodology for Building Thermal Dynamics Studies and Control Applications, **ASHRAE Transactions - SL-90-14-4**, 1990.
- Clarke, J.A., Energy Simulation in Building Design, **Adam Hilger Ltd.**, USA, 1985.
- Creder H., Instalações de Ar Condicionado, **LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora**, 5<sup>a</sup> Edição, Rio de Janeiro, 1996.
- Dion J.M., Dugard L., Franco A., Nguyen Minh Tri and Rey D., MIMO Adaptive Constraines Predictive Control Case Study: An Environment Test Chamber, **Automatica**, Vol. 27, No. \$, pp. 611-626, Great Britain, 1991.
- Incropera F.P. e De Witt D.P., Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, **LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora**, 4<sup>a</sup> Edição, Rio de Janeiro, 1998.
- Lamberts R., Dutra L. e Pereira F.O.R., Eficiência Energética na Arquitetura, **PW Editores**, São Paulo, 1997.