

MODELAGEM E SIMULAÇÕES DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA COM ENERGIA SOLAR.

Ary Franco Junior, Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira – Engenharia Elétrica – Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Campus de Ilha Solteira.

Algumas vezes, em processos industriais, existem fontes baratas de calor (por exemplo, energia solar e resfriamento de materiais pré-aquecidos) e a necessidade do aquecimento de certos produtos ou equipamentos. Em geral, essas fontes baratas de calor não fornecem uma fonte de energia constante. Por outro lado, os produtos ou equipamentos não devem ser aquecidos aleatoriamente, exigindo assim uma especificação previamente definida em termos de aquecimento. Esses fatos usualmente levam à exigência de sistemas de controle automático, para a transferência de energia térmica destas fontes para os produtos ou equipamentos. Uma dessas fontes de energia barata e alternativa que pode ser ressaltada é a energia solar, que foi abordada neste trabalho, porém levando mais em conta a parte do controle no aproveitamento desta energia.

Neste trabalho foi estudado o uso da energia solar, captada através de aquecedores solares residenciais utilizados no aquecimento de água, para aquecer um fluxo constante de ar (por exemplo, em torno de 60°C, para a secagem de frutas). A temperatura ambiente, e a temperatura do aquecedor solar, variam no decorrer do tempo (por exemplo, durante um dia), já que a energia solar não é uma fonte constante de energia. O projeto basicamente consiste em uma serpentina, que passa por dentro de um reservatório de água quente (residencial), onde o ar (que passa dentro da serpentina) será aquecido devido às trocas de calor entre a água quente e o ar à temperatura ambiente. Em seguida, a serpentina passa por uma válvula de mistura, onde o fluxo de ar já aquecido pode ser misturado ao ar à temperatura ambiente, caso a temperatura do ar aquecido seja maior do que a temperatura desejada. A seguir, o fluxo de ar passa por um aquecedor secundário que somente será ligado caso a temperatura do ar aquecido esteja abaixo da temperatura desejada. Então, para manter a temperatura final em um valor desejado, foi necessário projetar sistemas de controle automáticos, que atuassem no aquecedor secundário (elétrico ou a gás) e na válvula de mistura, visando uma temperatura desejável no final do processo, para uma temperatura ambiente arbitrária. O diagrama do processo está ilustrado na Figura 1.

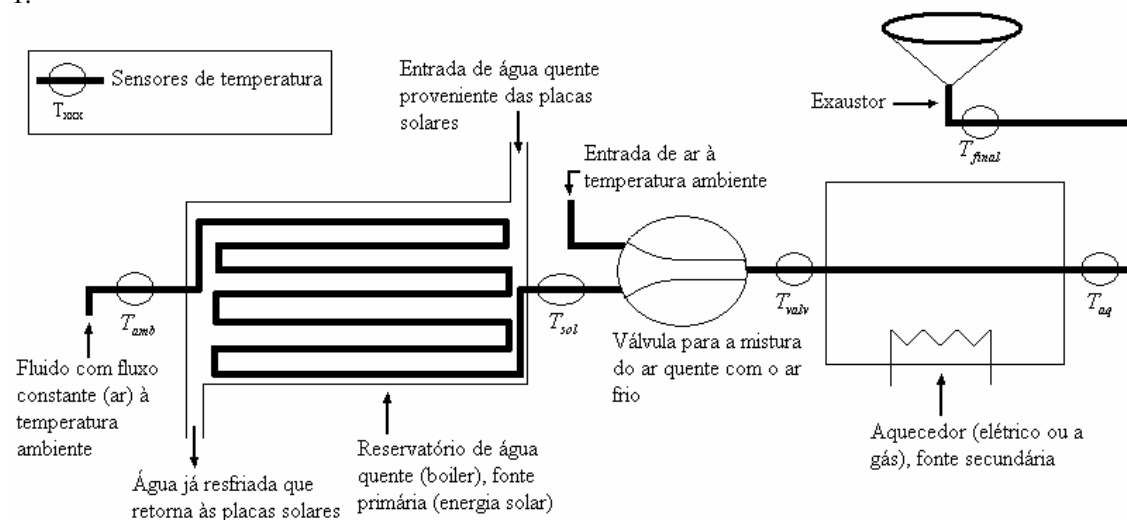


Figura 1 – Diagrama do Sistema de Controle de Temperatura.

O primeiro passo, antes de se projetar os sistemas de controle, constituiu em se fazer a modelagem matemática de todos os componentes do projeto, para que pudessem ser estudados seus comportamentos nas diversas situações a que seriam submetidos. Em seguida, foi desenvolvida uma pesquisa sobre as características e modelos de equipamentos de energia solar residencial. Também foram pesquisados dados sobre o processo de secagem de frutas, uma das aplicações deste projeto. Dois controladores foram projetados: o da válvula de mistura e o do aquecedor secundário, de acordo com as necessidades do projeto. A atuação dos sistemas de controle pôde ser simulada através do software MATLAB.

Para projetar os sistemas de controle, foi necessário avaliar a lógica e a hierarquia as quais todo o processo seria controlado. Para isto, analisou-se como cada componente do projeto deveria responder a uma dada situação, sempre visando o uso eficiente da energia. Esta lógica está descrita na Tabela 1.

Para simplificar, foi considerada a seguinte simbologia:

T_{amb} : temperatura ambiente (°C);

T_{aq} : temperatura na saída do aquecedor secundário (°C);

T_{sol} : temperatura na saída do aquecedor primário (°C);

T_{valv} : temperatura na saída da válvula de mistura (°C);

T_{final} : temperatura na entrada do secador de frutas (°C);

T_{des} : temperatura desejada na entrada do secador de frutas (em torno de 60°C).

Casos	T_{amb}	T_{sol}	Sistema de atuação da válvula	Sistema de atuação do aquecedor secundário
1	$>60^{\circ}\text{C}$	$>60^{\circ}\text{C}$	Situação não considerada	Situação não considerada
2	$>60^{\circ}\text{C}$	$\leq 60^{\circ}\text{C}$	Situação não considerada	Situação não considerada
3	$\leq 60^{\circ}\text{C}$	$>60^{\circ}\text{C}$	ON ($\alpha \in [0,1]$)	OFF
4	$\leq 60^{\circ}\text{C}$	$\leq 60^{\circ}\text{C}$	$T_{sol} > T_{amb}$ ON ($\alpha \rightarrow 1$)	ON
5			$T_{sol} \leq T_{amb}$ ON ($\alpha \rightarrow 0$)	ON

Tabela 1 – Comportamento dos componentes a serem controlados.

A válvula de mistura é apresentada em detalhes na Figura 2 (FRANKLIN, 1998).

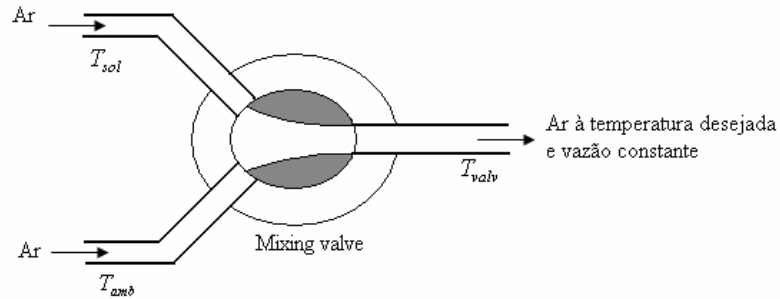


Figura 2 – Válvula de mistura.

A válvula funciona da seguinte maneira: a partir de sua posição central, seu núcleo pode girar tanto no sentido horário (aumentando a vazão do ar à temperatura T_{sol} e diminuindo a do ar à temperatura T_{amb}), como no sentido anti-horário (aumentando a vazão do ar à temperatura T_{amb} e diminuindo a do ar à temperatura T_{sol}). Desta forma, a vazão do fluxo de ar na saída da válvula é mantida constante. Supõe-se que o parâmetro responsável pelo giro do núcleo central da válvula seja a variável α , sendo que $\alpha \in [0,1]$. Foram adotadas as seguintes condições: $\alpha = 1$ para $T_{valv} = T_{sol}$, e $\alpha = 0$ para $T_{valv} = T_{amb}$. As temperaturas T_{sol} e T_{amb} foram consideradas constantes e iguais a \bar{T}_{sol} e \bar{T}_{amb} , respectivamente. Este fato pode ser justificado pela atuação rápida do sistema de controle da válvula em relação às variações nas temperaturas T_{sol} e T_{amb} .

Logo, considerou-se que a válvula apresenta a seguinte equação:

$$T_{valv}(t) = \alpha(t) \cdot \bar{T}_{sol} + (1 - \alpha(t)) \cdot \bar{T}_{amb} = \alpha(t) \cdot (\bar{T}_{sol} - \bar{T}_{amb}) + \bar{T}_{amb}. \quad (1)$$

Na análise acima foi considerado que $T_{sol} > T_{amb}$. Entretanto, a situação $T_{sol} \leq T_{amb}$ pode ocorrer e foi considerada no projeto do sistema de controle.

A partir da equação (1), pôde ser desenvolvido um diagrama de blocos (Figura 3) que representa a atuação da válvula, cujo parâmetro de controle é α . Em uma primeira análise, foi

escolhido um controlador do tipo integral. A função de transferência do sensor de temperatura ($\theta_m(s)/\theta_f(s) = 1/(\tau \cdot s + 1)$) foi considerada unitária (ou seja, foi considerado que $\tau \ll 1$) por simplicidade para uma análise inicial e também devido ao fato do sistema controlado responder lentamente. Então,

$$T_{valv}(s) = \frac{K_I \cdot (\bar{T}_{sol} - \bar{T}_{amb}) \cdot \bar{T}_{des} + s \cdot \bar{T}_{amb}}{s + K_I \cdot (\bar{T}_{sol} - \bar{T}_{amb})} \cdot \frac{1}{s}. \quad (2)$$

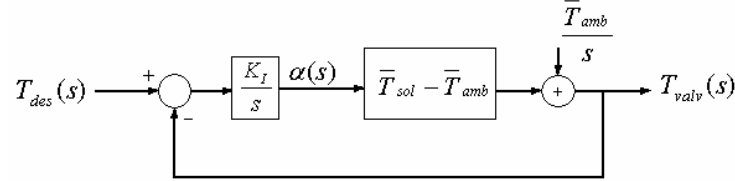


Figura 3 – Diagrama de blocos do controle do misturador.

Para garantir a estabilidade deste sistema, é necessário que $K_I \cdot (\bar{T}_{sol} - \bar{T}_{amb}) > 0$. De acordo com a Tabela 1, o sistema de atuação da válvula pode trabalhar com $\bar{T}_{sol} \leq \bar{T}_{amb}$ ou $\bar{T}_{sol} > \bar{T}_{amb}$. Assim, o ganho K_I deve ter sinais adequados para assegurar a estabilidade. Mantida a temperatura ambiente fixa em 30°C, e considerando $T_{des}=60^\circ\text{C}$, para $\bar{T}_{sol} > 60^\circ\text{C}$, $T_{des}=\bar{T}_{sol}$ para $\bar{T}_{amb} < \bar{T}_{sol} < 60^\circ\text{C}$ e $T_{des}=\bar{T}_{amb}$ para $\bar{T}_{sol} < \bar{T}_{amb}$, o sistema foi simulado no software MATLAB para diversas temperaturas de \bar{T}_{sol} (20°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C e 80°C), conforme mostra a Figura 4. Nesta simulação, foi adotado o ganho $K_I = 10$ para $\bar{T}_{sol} > \bar{T}_{amb}$ e $K_I = -10$ para $\bar{T}_{sol} < \bar{T}_{amb}$.

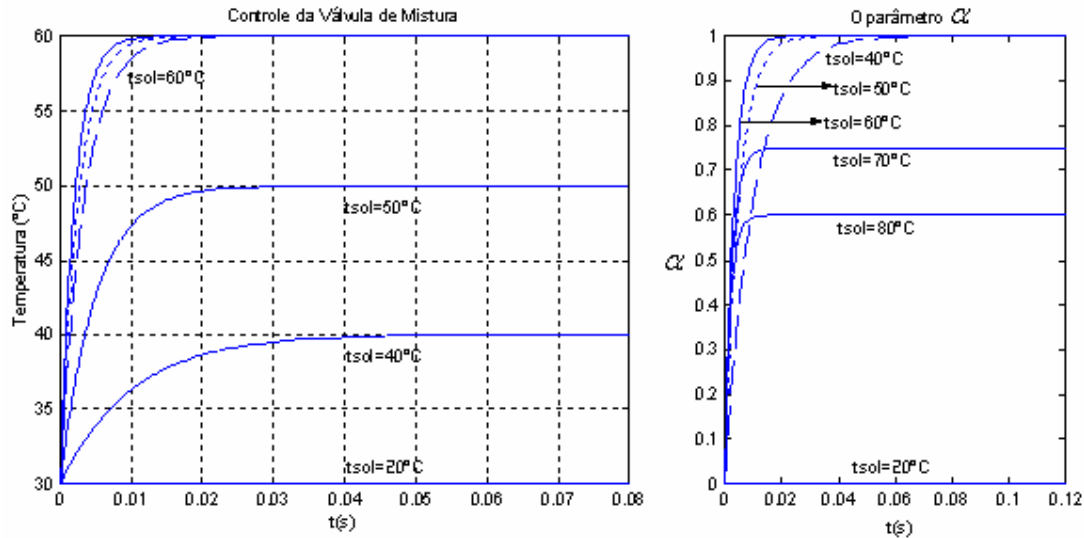


Figura 4 – Resposta do sistema de controle em relação à temperatura (T_{valv}) e ao parâmetro α .

O outro sistema a ser controlado é o aquecedor secundário. Este sistema foi modelado matematicamente, e obteve-se (OGATA, 1998):

$$T_{aq}(s) = \frac{R}{(RCs + 1)} \cdot H(s) + \frac{1}{(RCs + 1)} \cdot T_{valv}(s). \quad (3)$$

Sendo:

R = resistência térmica ($^\circ\text{C s/Kcal}$), sendo $R=1/Gc$;

G = vazão da massa de ar através da câmara de aquecimento (Kg/s);

c = calor específico de ar (Kcal/Kg $^\circ\text{C}$);

C = capacitância térmica do ar contida na câmara de aquecimento (Kcal/ $^\circ\text{C}$), sendo $C=Mc$;

M = massa de ar contida na câmara de aquecimento (Kg);

H = valor estacionário do fluxo térmico de entrada (Kcal/s).

A partir da equação (3), montou-se o diagrama de blocos do sistema de controle. Utilizou-se um controlador PI, para que melhor fosse controlado este processo (KUROKAWA, 2004). Logo:

$$T_{aq}(s) = \frac{s(K_p \cdot \bar{T}_{des} + \bar{T}_{valv}) + K_I \cdot \bar{T}_{des}}{RCs^2 + s \cdot (1 + K_p) + K_I} \cdot \frac{1}{s}. \quad (4)$$

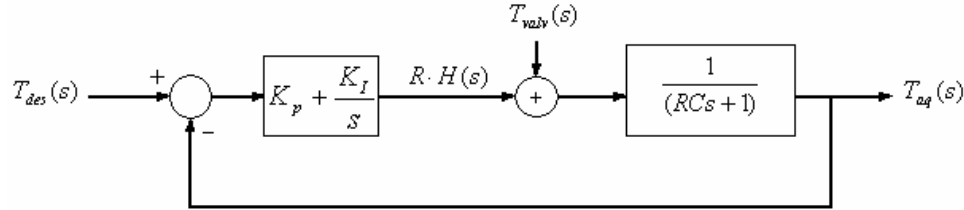


Figura 5 – Diagrama de controle do aquecedor secundário.

Como $RC > 0$ então deve-se ter $(1 + K_p) > 0$ e $K_I > 0$ para garantir a estabilidade. O sistema foi simulado no software MATLAB (Figura 6), considerando que $K_I = K_p = 10$ e $RC = 1$, para diversas temperaturas de T_{valv} (30°C, 40°C, 50°C e 60°C). O projeto foi feito procurando-se obter uma resposta transitória rápida e com um pequeno overshoot.

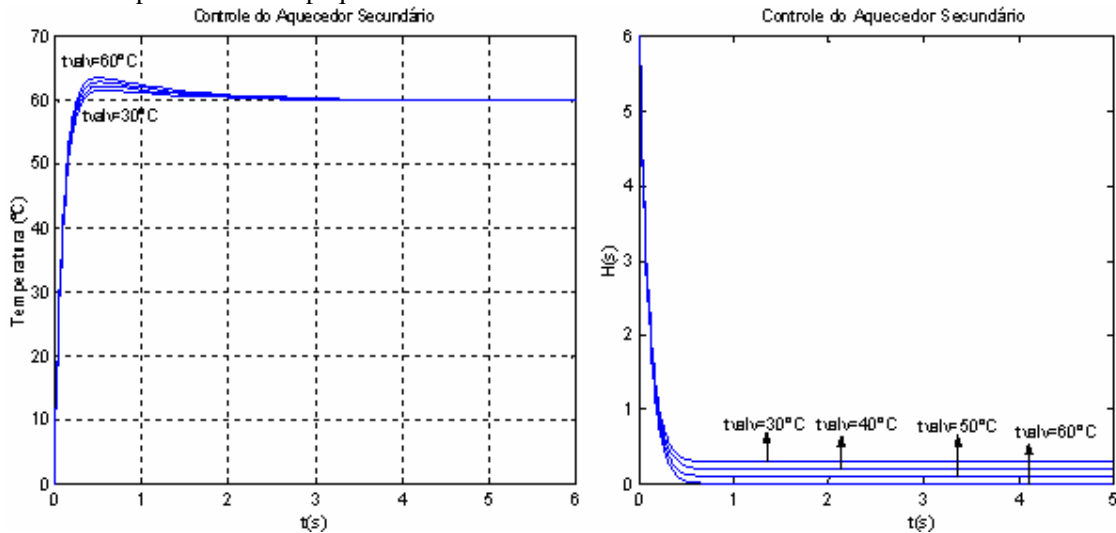


Figura 6 – Resposta do sistema de controle em relação à temperatura (T_{aq}) e à entrada de calor $H(s)$.

Concluiu-se que controladores do tipo PI (Proporcional-Integral), e do tipo I (Integrador) são adequados para o controle dos sistemas de aquecimento secundário e da válvula de mistura, respectivamente. Das simulações digitais pode-se observar que o tempo de estabilização dos sistemas controlados foi menor que 4s e que houve um pequeno overshoot (no caso do aquecedor secundário), que não acarreta problemas ao processo, pois o overshoot ocorre num curto período de tempo.

Referências Bibliográficas

1. FRANKLIN, G. F.; POWELL, J.D.; WORKMAN, M. *Digital Control of Dynamic Systems*. 3rd ed. California: Addison-Wesley, 1998.
2. KUROKAWA, E. S. *Modelagem, Projeto e Simulações de um Sistema de Controle de Temperatura*. Relatório final de iniciação científica com bolsa UNESP-PIBIC (08.2003 a 07.2004). Ilha Solteira, 2004.
3. OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1998.

Bolsa: CNPq/PIBIC