

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - ESCOLA DE
ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DELET
ENG04073 - SISTEMAS DE CONTROLE ELETROELETRÔNICOS**

**Regulador de Temperatura com Aquecedor
Ôhmico
PV3 - Projeto e Simulação do Controlador**

**Alisson Claudino de Jesus
Lucas Curcio Sessegolo
Gabriel Luis de Oliveira**

Porto Alegre, 18 de dezembro de 2017.

1. Introdução

Enquanto que a modelagem é apenas um estudo do sistema, em que se busca compreender seu funcionamento, o projeto do controlador é a etapa em que são elaboradas e testadas as formas de intervir nele de forma a deixá-lo com as características desejadas. Como será mostrado, estudamos o melhor tipo de controlador para o nosso projeto e, através de ferramentas computacionais, identificamos aquele que fornece a resposta mais próxima da ideal.

2. Especificações Desejadas

A função de transferência em malha aberta identificada, $G(s) = \frac{0.55371}{1753.1s+1}$, é muito lenta, com uma constante de tempo τ de 1753s (cerca de 29min). Para que o projeto tenha aplicação prática, este tempo deve ser consideravelmente reduzido. A faixa de operação estipulada é de 52°C a 100°C, e como potência que mantém a temperatura fixa no limite mínimo é de 34.4W, o maior salto de potência possível é de 465.6W. Simulando tal salto no sistema em malha aberta, equivalente a pôr o atuador em saturação, obtemos que a demora para a temperatura subir 48°C, cobrindo toda a faixa de operação, é de 6 minutos.

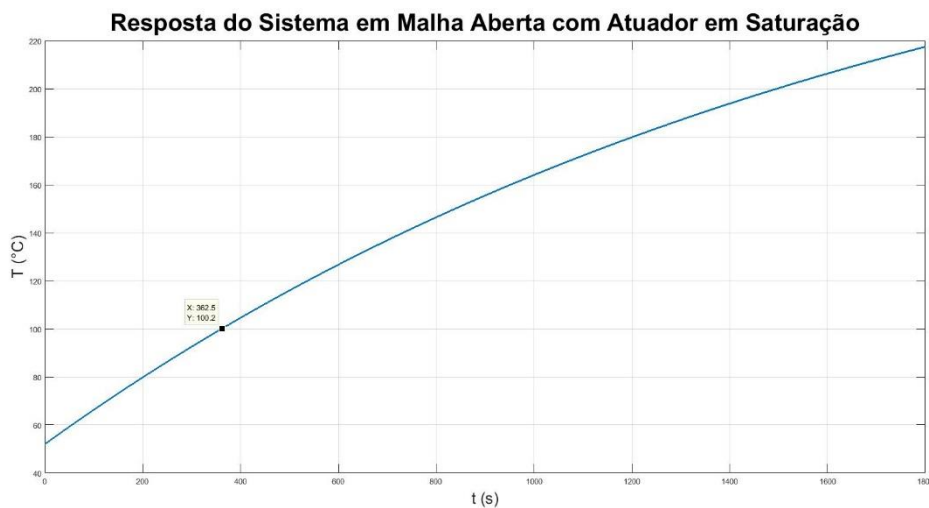


Figura 1 - Resposta do sistema ao atuador em saturação. O sistema atinge a temperatura máxima da faixa de operação após cerca de 6 minutos de operação.

Este não é o menor tempo de acomodação possível, já que as estruturas de controle padrão (P, PI, PD e PID) preveem um sinal de controle que muda gradualmente sem atingir a saturação do atuador, mas oferece uma estimativa para este mínimo. Considerando essa limitação, julgamos que um tempo de acomodação de no máximo 12min é razoável, o que equivale a uma redução de quase dez vezes quando comparado ao sistema em malha aberta. Essa exigência, que julgamos ser a mais importante, tem grande impacto na natureza do controlador, como será abordado na seção **Obtenção do Controlador**.

Por se tratar de um sistema térmico, em que a queda da temperatura depende indiretamente da potência do atuador, idealmente o sistema não deve apresentar *overshoot*.

Por fim, o sistema deve apresentar resposta nula ao erro, ainda mais quando o distúrbio na forma de perda de potência para o ambiente é parte intrínseca de sua operação. Isso

restringe a escolha do controlador a um PI ou PID. A dinâmica da resposta ao erro, inclusive o tempo de acomodação, deve ser similar à da resposta à referência.

Assim, as exigências da resposta do sistema em malha fechada são:

Parâmetro		Características Desejadas
1	Tempo de acomodação	Menor que 12 minutos
2	<i>Overshoot</i>	Nulo
3	Erro em regime permanente	Nulo e com dinâmica similar à resposta à referência

3. Obtenção do Controlador

Para determinar a função de transferência do controlador que atendesse as especificações acima, foi utilizado o método do local das raízes (*root locus*) através da ferramenta de design de sistemas de controle do programa MATLAB.

Ficou evidente que um controlador com as características desejadas era impraticável, visto que uma redução tão grande no tempo de acomodação invariavelmente implicava em uma potência maior que disponível no começo da operação, tanto para um controlador PI quanto PID. Seria necessário, portanto, ou desconsiderar a exigência (1) ou reduzir a faixa de operação, diminuindo o maior salto na referência possível e, portanto, o salto requerido na potência, o sinal de controle. Como qualquer uma destas opções comprometeria a funcionalidade do projeto, optamos por alterar o tipo de controlador.

De fato, a maior parte das aplicações comerciais deste tipo utiliza o sistema de controle dito *bang-bang*, em que o atuador está constantemente em saturação. A função que o implementa é:

$$u(t) = \begin{cases} \bar{u}, & e(t) > 0 \\ \underline{u}, & e(t) < 0 \end{cases}$$

Sendo $e(t)$ o erro de segmento e \bar{u} e \underline{u} os limites superior e inferior de saturação do atuador, respectivamente. Esse tipo de controle normalmente é a solução de tempo ótimo (que minimiza o tempo de resposta, em inglês *Time-Optimal*) para vários tipos de sistemas. No entanto, a implementação deste controlador deve considerar o efeito de *chattering*, em que o atuador rapidamente oscila entre os limites de saturação quando $e(t)$ tende a zero. Esse problema pode ser contornado pela adição de um laço de histerese, que por sua vez faz com que o sinal de saída oscile em torno do ponto desejado.

O controlador por que optamos se baseia no conceito de *Proximate Time-Optimal Control* (PTOS), criado para conciliar a resposta rápida do *bang-bang* com a precisão dos controladores lineares usuais (P, PI, PD e PID), em especial para sistemas com servomecanismos. Nessa configuração, o atuador trabalha em seu máximo até que o sinal de saída atinja certo valor, quando o controlador passa a agir como um proporcional derivativo.

No nosso caso, dada a resposta lenta do sistema, consideremos ser razoável assumir que ele será estável e funcional mesmo com ação integrativa requerida pela exigência (3). Ainda assim, especial atenção deve ser dada à parte integral do sinal controle, que na forma discreta assume uma natureza iterativa e, portanto, precisa de um valor inicial. Este será calculado de forma a possuir o mesmo valor que teria caso fosse o sinal de controle em regime permanente do sistema apenas com a parte linear após um salto de $(r - T_x)$, sendo a r o valor do salto real na referência e T_x a diferença de temperatura a partir da qual o controlador muda a forma de operação.

Este parâmetro T_x , a diferença de temperatura a partir da qual o controlador muda de comportamento, é um novo grau de liberdade na sua concepção. Deve ser suficientemente pequeno para permitir um ganho alto no atuador, necessário para reduzir drasticamente o tempo de acomodação como desejado, mas não tão pequeno a ponto de reduzir a eficiência do controlador, que ficaria comprometida com uma faixa de excursão muito pequena. Optamos por 6°C, equivalente a um oitavo faixa de operação do sistema.

Dada a faixa de operação, o maior valor possível da variação do sinal de controle é o de quando se aquece a água à 100°C e o controlador passa a agir como um PI a partir dos 94°C. Nesta temperatura, a potência em regime permanente seria de 53W. A faixa de excursão da potência no atuador, um aquecedor de 500W, seria de 447W. Como o salto na referência percebido pelo controlador PI seria de 6°C, o maior valor possível na resposta ao salto unitário na referência é de 74,5W.

Ainda que a mudança no tipo de controlador possibilite o cumprimento da exigência (1), não encontramos solução que atendesse à (2) e à (3) simultaneamente, novamente devido à redução drástica no tempo de acomodação. Apesar de se tratar de um sistema de controle térmico, julgamos ser razoável a presença de *overshoot* se isto torna a resposta ao distúrbio mais rápida, até porque o projeto visa aquecimento de água para consumo humano, algo menos sensível que, por exemplo, aplicações químicas ou industriais.

A melhor solução encontrada foi através de um controlador PI, que é definido pela relação:

$$C_{PI}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_I \left(\frac{T_i s + 1}{s} \right) = K_P \left(\frac{s + z}{s} \right)$$

Sendo:

K_P o ganho proporcional;

T_i o tempo integral;

K_I o ganho integral, $K_I = \frac{K_P}{T_i}$;

z o zero adicionado pelo PI, $z = \frac{1}{T_i}$;

Segue a tabela com os parâmetros ajustados:

Parâmetro	Valor
K_P	74.47
z	0.0085
K_I	0.63299
T_i	117.65

Cujos parâmetros da resposta são:

Parâmetro	Valor
Tempo de acomodação da resposta ao salto na referência	363s (6min 3s)
<i>Overshoot</i> da resposta ao salto na referência	15.5%
Tempo de acomodação da resposta ao distúrbio tipo salto no sinal de controle	372s (6min 12s)

As simulações que forneceram esses valores estão na seção **Simulações** (ver figura 3). A função de transferência do controlador PI é então:

$$C(s) = 74.47 \cdot \frac{s + 0.0085}{s} = \frac{74.47s + 0.63299}{s}$$

A equação que rege o comportamento do sinal de controle $u(t)$, $U(s)$ no domínio da frequência, é:

$$\begin{cases} U(s) = C(s)E(s), & e(t) < 6^\circ C \\ u(t) = \bar{u}, & e(t) > 6^\circ C \end{cases}$$

4. Simulações

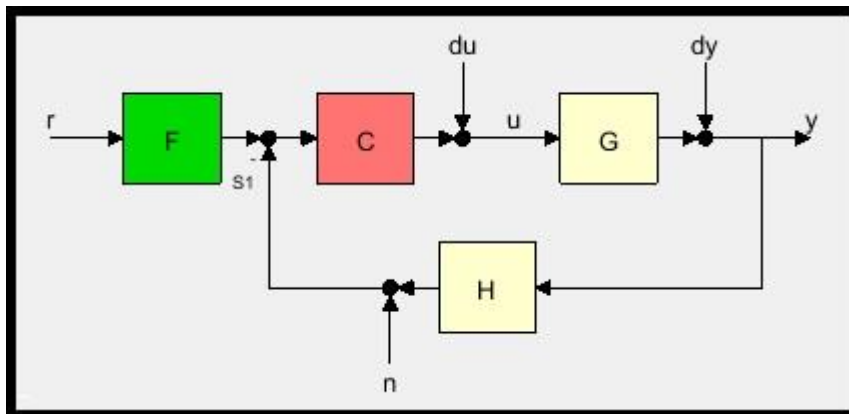


Figura 2 - Modelo utilizado. Aqui dy , n são considerados nulos (distúrbio apenas em du) e F e H são ganhos unitários.

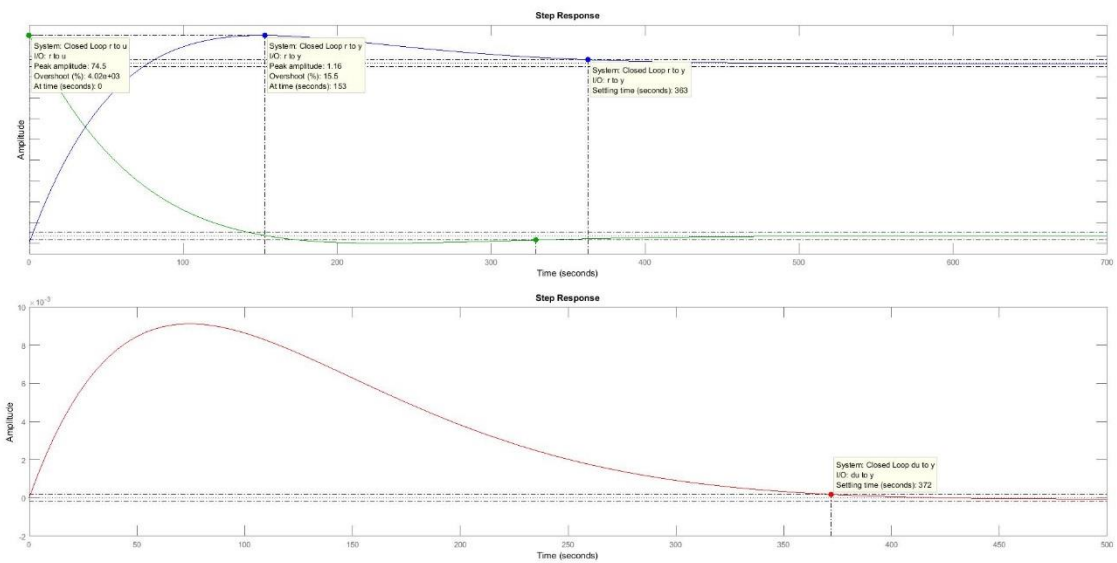


Figura 3 – Resposta do sistema a um salto unitário na referência **Azul**: Resposta do sistema; **Verde**: resposta do atuador; **Vermelho**: resposta do sistema a um salto em du (distúrbio);

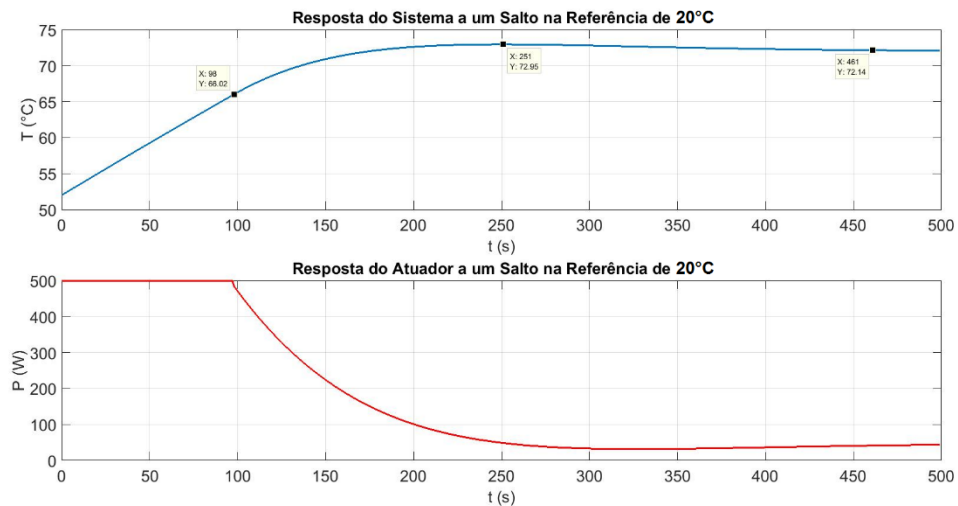


Figura 4 - Resposta do sistema a um salto na referência de 20°C. O atuador aplica 500W até que a temperatura atinge 66°C (a temperatura final subtraída de 6°C) em $t=96\text{s}$. Então o controlador passa a agir como um PI.

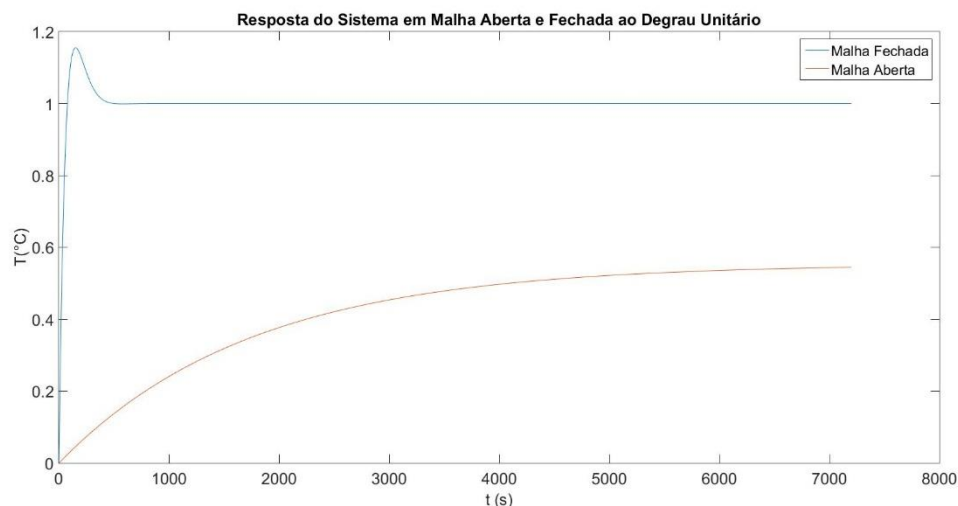


Figura 5 - Comparação entre a resposta do sistema em malha aberta e o em malha fechada com o controlador. De nota o erro nulo em regime permanente e a resposta muito mais rápido.

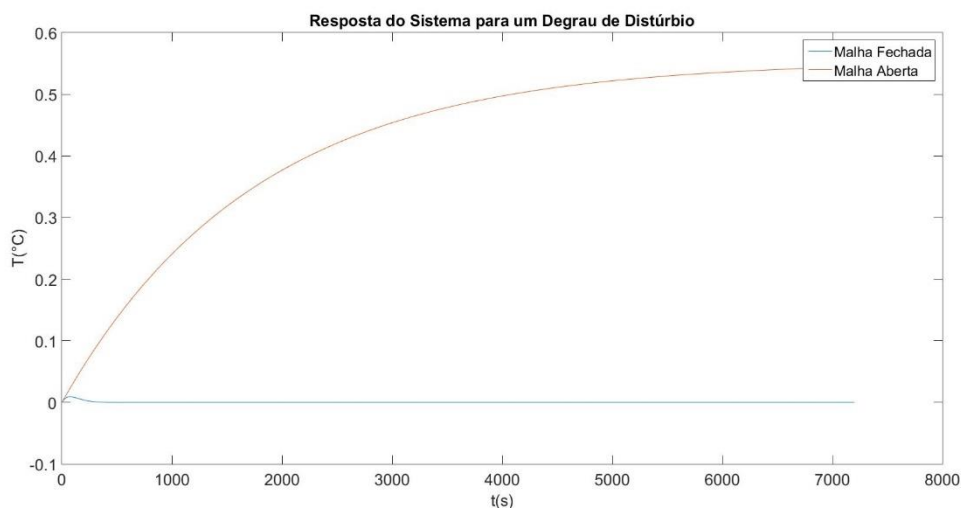


Figura 6 - Comparação entre a resposta do sistema em malha aberta e o em malha fechada com o controlador a um degrau de distúrbio.

4. Bibliografia

OGATA, Katsuhiku. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

BAZANELLA, Alexandre Sanfelice; SILVA JUNIOR, João Manoel Gomes da. **Sistemas de controle: princípios e métodos de projeto**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2014.

BAZANELLA, Alexandre Sanfelice; SILVA JUNIOR, João Manoel Gomes da. **Sistemas de controle: princípios e métodos de projeto**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2014.

BEDIN NETO, Nelso Rugero. **Controlador não-linear para servomecanismos de alto desempenho em tempo discreto**. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.