

# Relatório de Atividade

## Sistemas Especialistas

Débora Oliveira

Prof Antonio Marcus, Automação Inteligente 20.3

3 de dezembro de 2020

Esse documento tem por objetivo descrever a implementação de um sistema especialista para a sintonia de um controlador PID para um processo SISO (*single input - single output*, única entrada - única saída). Esse algoritmo determina um conjunto de ganhos para obter a resposta ao degrau com os parâmetros de *overshoot*, *damping*, tempo de subida, período e *overshoot ratio* desejados.

### 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um controlador PID pode ser representado conforme a seguinte função de transferência:

$$G(s) = K_c \left[ \frac{1}{T_i s} + T_d s + 1 \right] \quad (1)$$

para  $K_c$  o ganho proporcional,  $T_i$  o tempo de reset e  $T_d$  o termo derivativo (LITT, 1991). Esses três parâmetros devem ser determinados conforme a resposta ao degrau desejada do sistema em malha fechada. A caracterização dessa resposta é baseada em cinco atributos:

- *Overshoot* (sobre-sinal): representa a diferença percentual entre a magnitude do maior pico da resposta ao degrau e o valor em regime permanente;
- *Damping*: é proporcional ao nível oscilatório da resposta ao degrau. Para  $P_1$  e  $P_2$  as magnitudes do primeiro e segundo pico e  $V_1$  a magnitude do primeiro vale da resposta ao degrau, *damping* é definido pela seguinte equação (LITT, 1991)

$$D = \frac{P_2 - V_1}{P_1 - V_1} \quad (2)$$

- Tempo de subida: indica o intervalo de tempo que a resposta delonga para atingir de 10% a 90% do valor em regime permanente;
- Período: é o período de oscilação da primeira oscilação da resposta ao degrau;

- *Overshoot ratio*: representa a relação da magnitude do segundo pico em relação ao primeiro pico da resposta ao degrau. Para  $R$  o valor da malha fechada em regime permanente, o *overshoot ratio* é definido como:

$$OR = \frac{P_2 - R}{P_1 - R} \quad (3)$$

Para a sintonia, foi empregado um sistema especialista. Essa técnica de controle ajusta os parâmetros do controlador ( $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$ ) conforme um banco de regras. Esse conjunto de normas foi determinado em como:

1. A constante proporcional  $K_c$  é diretamente proporcional ao *overshoot* e inversamente proporcional ao período, ao *damping* e tempo de subida da resposta ao degrau;
2. O parâmetro  $T_i$  é diretamente proporcional ao tempo de subida e inversamente proporcional ao *overshoot*, *damping* e *overshoot ratio* da resposta ao degrau;
3. O parâmetro  $T_d$  é diretamente proporcional ao período e inversamente proporcional ao *overshoot*, *damping* e *overshoot ratio* e tempo de subida da resposta ao degrau;

Essas regras foram determinadas experimentalmente comparando as características da resposta ao degrau para um conjunto de ganhos iniciais  $[K_c, T_i, T_d]$  e para a variação de 4/3 de cada valor inicial.

### 2 DESENVOLVIMENTO

O sistema especialista foi construído e simulado utilizando blocos no Simulink. O diagrama pode ser compreendido em três etapas: análise da resposta ao degrau, interpretação das características da curva e atualização dos ganhos.

## 2.1 ANÁLISE DA RESPOSTA AO DEGRAU

Essa etapa recebe como entrada os parâmetros  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$  e fornece os valores de *overshoot*, *damping*, tempo de subida, período e *overshoot ratio* como saída.

Os valores do tempo de subida e *overshoot* foram diretamente obtidos da função `stepInfo`. Os picos e vales foram obtidos utilizando a função `findPeaks`. O período de oscilação foi determinado analisando o cruzamento com zero da função

$$p(t) = y(t) - R \quad (4)$$

para  $y(t)$  a resposta ao degrau.

Para respostas cuja estabilidade é rapidamente alcançada, é encontrado apenas um pico e nenhum vale. Picos também não são encontrados para baixos *overshoot*. Dessa forma, a estimativa de *overshoot ratio* e *damping* se tornam instáveis e de baixa confiabilidade.

### 2.1.1 INTERPRETAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA CURVA DE RESPOSTA AO DEGRAU

Essa etapa recebe como entrada os parâmetros *overshoot*, *damping*, tempo de subida, período e *overshoot ratio* e retorna a direção de modificação dos ganhos  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$  como saída.

Primeiramente, é calculado o erro normalizado  $E_i$  do valor desejados dos cinco parâmetros em relação à referência. Em seguida, esse valor é ponderado com o peso  $w_i$  considerando a seguinte ordem de relevância (LITT, 1991): minimizar o *overshoot*, não impactar nos outros parâmetros e garantir a estabilidade.

Em seguida, é atribuído um sinal  $s_i$  ao erro normalizado ponderado  $E_i w_i$  de cada característica da curva. Esse sinal é negativo caso o parâmetro seja diretamente proporcional ao ganho analisado.

Por fim, são somados os erros ponderados e com sinal  $s_i E_i w_i$  referentes a cada ganho  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$  conforme a seguinte equação:

$$x(n) = \sum_{i=1}^5 s_i w_i E_i \quad (5)$$

A direção de mudança de cada ganho é determinada pela função  $sgn(x)$  dada por

$$sgn(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (6)$$

## 2.2 ATUALIZAÇÃO DOS GANHOS

Essa etapa possui como entrada a direção de modificação dos ganhos e fornece como saída os ganhos  $K_c$ ,

$T_i$  e  $T_d$  para a próxima iteração. Essa modificação de um ganho  $K$  genérico é realizada conforme a equação de atualização (LITT, 1991)

$$K(n) = K(n-1)[1 + f(n)^{-1}sgn(x_K(n))] \quad (7)$$

para  $f(n)$  a sequência de Fibonacci determinada por

$$f(n) = \begin{cases} 1, & n = 1, 2 \\ f(n-1) + f(n-2), & n \geq 3 \end{cases} \quad (8)$$

Cada ganho  $K$  possui pode possuir um valor  $n$  diferente. O passo  $n$  é incrementado apenas caso o termo seja atualizado, isto é,  $x_K(n) \neq 0$ .

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DO EXPERIMENTO

Os valores iniciais do utilizados foram  $K_c = 15$ ,  $T_i = 6,75$  e  $T_d = 1,69$  (LITT, 1991). As referências para a resposta ao degrau foram *overshoot* de 10%, *damping* de 0,5; tempo de subida de 2 segundos, período de 10 segundos e *overshoot ratio* de 0,25.

Tendo em vista o número de casas decimais do ponto flutuante das variáveis propagadas no diagrama Simulink, a fronteira dos valores de  $sgn(x)$  da equação (6) foi alterada para 0,01 e -0,01.

O processo controlado nesse estudo é representado pela seguinte função de transferência:

$$H(s) = e^{-s}(10s + 1)^{-2} \quad (9)$$

Dessa forma, o sistema possui *lag* (atraso) e a resposta em regime permanente é  $R = 1$ .

Os pesos iniciais foram determinados conforme Litt (1991): 30 para *overshoot*, 20 para *overshoot ratio* e *damping* e 1 para período e tempo de subida.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

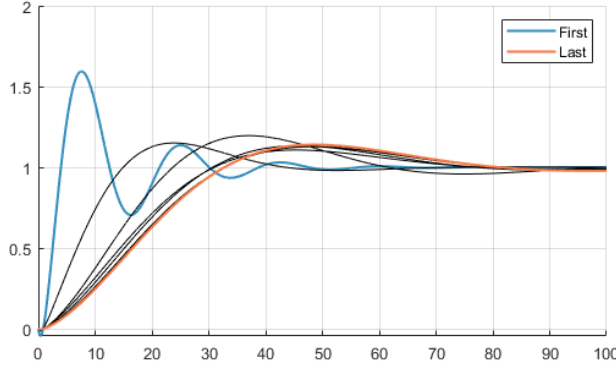
Foram realizados quatro experimentos. O primeiro experimento considera a formulação de regras apresentada nas Seção 1 e Seção 2. O segundo e quarto experimentos consistiram na atualização dos pesos  $w_i$  utilizados na equação (5). No terceiro experimento, foi alterado o conjunto de regras para a atualização dos parâmetros. Os valores dos ganhos e parâmetros da resposta ao degrau obtido em cada experimento está apresentado na Tabela 1.

Inicialmente, foi executado o diagrama Simulink conforme os valores apresentados na Subseção 2.3. As curvas de resposta ao degrau para os ganhos sintonizados durante o experimento 1 estão ilustrados na Fig. 1. Com o intuito de facilitar a visualização, estão apresentadas as curvas referentes aos ganhos iniciais e intervaladas de 0,01 segundos até o conjunto de ganhos finais em 0,25 segundos de simulação.

**Tab. 1.** Ganhos sintonizados utilizando o sistema especialista e características da resposta ao degrau resultante do controlador PID para os experimentos realizados.

Nº do Exp.	$K_c$	$T_i$	$T_d$	<i>Overshoot</i> (%)	<i>Damping</i>	Tempo de subida (s)	Período (s)	<i>Overshoot Ratio</i>
1	0,6624	8,817	2,269	16,45	0,2156	22,28	97,05	0,1711
2	0,6624	9,064	2,033	15,31	0,2102	22,52	97,52	0,1711
3	7,287	19,72	1,994	22,4	0,2233	4,577	24,16	0,0231
4	12,89	27,64	4,235	9,603	0,0340	1,758	10,72	0,0941

**Fig. 1.** Curvas de resposta ao degrau sintonizadas durante o experimento 1 pelo sistema especialista.



Fonte: Autoria própria.

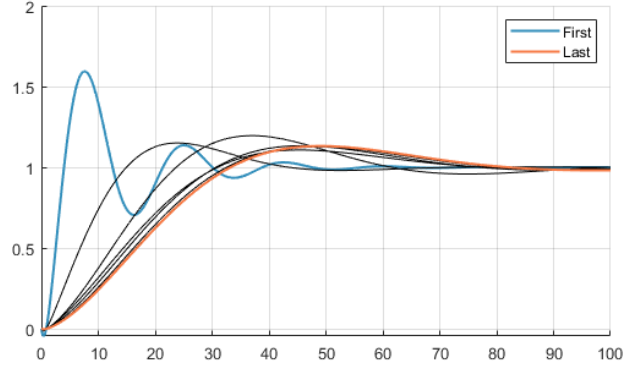
Observando a Fig. 1 e o período e tempo de subida apresentados na Tabela 1, é evidente a resposta ao degrau é mais lenta em relação aos parâmetros desejados. Com o intuito de diminuir o erro do período, os pesos  $w_i$  foram relocados para o experimento 2 segundo a divisão: 30 para *overshoot*, 11 para *overshoot ratio*, 20 para *damping*, 10 para período e 1 para tempo de subida.

As curvas de resposta ao degrau para os ganhos sintonizados durante o experimento 2 estão ilustrados na Fig. 2. Analisando a Fig. 2 e os valor de período e tempo de subida apresentados na Tabela 1, fica claro que a atualização dos pesos diminuiu o erro do *overshoot*, porém não contribuiu para a minimização do erro do período e do tempo de subida. Portanto, para o terceiro experimento, foram alterados o conjunto de regras do sistema especialista.

Tendo em vista a ordem de grandeza  $10^{-1}$  para o termo proporcional, retirou-se o termo referente ao erro do *overshoot* da soma cumulativa  $x_{K_c}$  determinada pela equação (5). As curvas de resposta ao degrau para os ganhos sintonizados durante o experimento 3 estão ilustrados na Fig. 3.

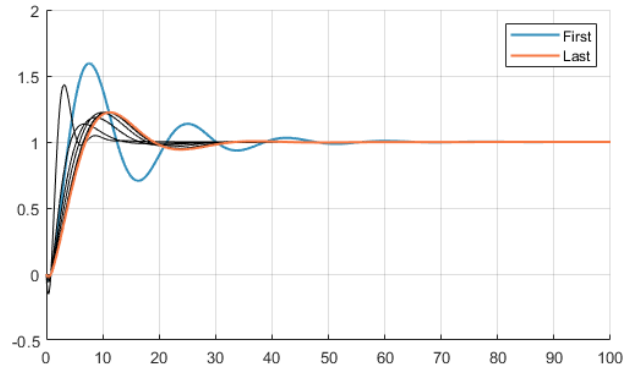
Conforme os valores apresentados na Tabela 1, é notório que houve um aumento do erro para o *overshoot*, período e *overshoot ratio* e uma diminuição do erro para o tempo de subida e *damping*. Também ocorreu o aumento de uma ordem de grandeza no ganho proporcional  $K_c$ .

**Fig. 2.** Curvas de resposta ao degrau sintonizadas durante o experimento 2 pelo sistema especialista.



Fonte: Autoria própria.

**Fig. 3.** Curvas de resposta ao degrau sintonizadas durante o experimento 3 pelo sistema especialista.



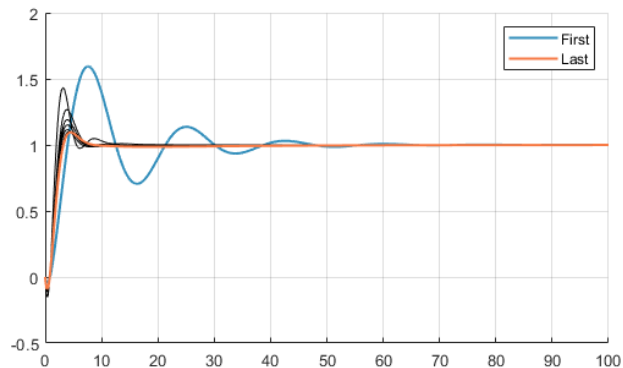
Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de minimizar o erro do *overshoot*, período e *overshoot ratio*, os pesos  $w_i$  foram relocados como para o experimento 4: 35 para *overshoot* e período, 20 para *overshoot ratio*, 1 para *damping* e 9 para tempo de subida.

As curvas de resposta ao degrau para os ganhos sintonizados durante o experimento 4 estão ilustrados na Fig. 4. Analisando os valores apresentados na Tabela 1, fica claro o ponto ótimo para os parâmetros de *overshoot*, período e tempo de subida.

Conforme citado na Seção 1, a medição do *damping* e *overshoot ratio* não são estáveis para curvas sem duas oscilações como a apresentada na Fig. 4.

**Fig. 4.** Curvas de resposta ao degrau sintonizadas durante o experimento 4 pelo sistema especialista.



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, os ganhos  $[K_c, T_i, T_d] = [12.89, 27.64, 4.235]$  foram considerados resultados ótimos da sintonia.

#### 4 CONCLUSÃO

Esse relatório descreve a sintonia de um controlador PID de um processo SISO por meio de um sistema especialista. Essa técnica de controle ajusta os ganhos com base na avaliação de um conjunto de regras.

Observando a Fig. 4, é evidente que a ação de controle implementada no experimento 4 garante a estabilidade do sistema. Apesar da proximidade das características de *overshoot*, tempo de subida e período estarem próximos aos desejados, o erro de *damping* e *overshoot ratio* não é desprezível. Entretanto, deve-se ter em vista a instabilidade e a baixa confiabilidade da medição desses dois últimos parâmetros.

Esse sistema poderia ser otimizado modificando a função  $f(x_K)$  determinada pela equação (8) por uma função exponencial convergência mais lenta, tal como  $e^{0.1}$ . Dessa forma, os parâmetros  $K(n)$  definidos pela equação (7) estabilizariam em um maior número de iterações.

Outro ajuste que poderia ser adicionado ao sistema é uma algoritmo de atualização dos pesos. Essa modificação poderia acontecer a cada N iterações do sistema especialista. Tendo em vista que esse problema é de busca de uma solução ótima, poderia-se empregar um algoritmo genético.

#### 5 REFERÊNCIAS

[1] LITT, Jonathan. **An Expert system to Perform On-Line Controller Tuning**. IEEE Control Systems, 1991. DOI 0272-1708/91/0400-0018