

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Desenvolvimento de sistema de controle para o processo de preparação de partículas esféricas por spray-cooling para motores-foguetes híbridos.

Bolsista: Cleiton Oliveira Rodrigues

Orientador(a): Marcio Yuji Nagamachi

Período a que se refere o relatório: Novembro de 2016 a Abril 2017

### 1. Resumo

O processo de *spray-cooling*, em desenvolvimento para o preparo de partículas esféricas de parafina para motores híbridos, envolve fenômenos muito complexos que ocorrem no bocal de atomização, isso faz com que um esquema sofisticado de controle seja necessário de modo que o processo possa ser conduzido de forma reproduzível. A arquitetura do sistema de controle para esse processo já foi definida em uma fase anterior de modelagem e simulação. Neste estudo, busca-se a definição dos três controladores de realimentação e a sintonização dos seus parâmetros. As curvas-respostas ao degrau em malha aberta dos três processos foram ajustadas por meio de funções de primeira e segunda ordem. Os ajustes foram bem sucedidos, tendo sido então empregadas como funções de transferência das respectivas malhas fechadas de controle. Foram ainda definidos os controladores do tipo PI (Proporcional-Integral) para os dois processos de primeira ordem e do tipo P (Proporcional) para o processo de segunda ordem. As três funções globais de transferência em malha fechada foram obtidas, assim como a sintonização dos parâmetros dos seus controladores  $K_c$  e  $\tau_i$ . Os resultados mostram que as malhas fechadas obtidas são estáveis e apresentam excelentes desempenhos, o que permitem o seu emprego no processo de *spray-cooling* em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa.

### 2. Introdução

O emprego de partículas esféricas de parafina tem surgido como uma das principais alternativas ao uso de parafina maciça em grãos combustíveis de motores foguetes híbridos. O processo de preparação dessas partículas por *spray cooling*, assim como o desenvolvimento desse novo grão, têm sido objetos de estudos pioneiros conduzidos por

nosso grupo de pesquisa. Esse processo se destaca pela sua eficiência e alto rendimento<sup>1,2</sup>, além da possibilidade de ajuste do diâmetro das partículas. O processo consiste em produzir gotículas esféricas de parafina fundida através de um bocal do tipo duplo-fluido assistido por ar<sup>3</sup>. Essas gotículas são então solidificadas em contato com o ar frio circulante no aparelho e, em seguida, coletadas por meio de um ciclone de separação.

A modelagem e a simulação desse processo já foram desenvolvidas em etapas anteriores, assim como a definição da arquitetura do sistema de controle. O emprego de sistemas de controle é cada vez mais comum, sendo normalmente encontrados em veículos espaciais, sistemas robóticos e em sistemas de controle de processos industriais. Porém, a sintonização dos parâmetros dos controladores nesse processo é uma tarefa particularmente difícil, pois todas as variáveis controladas do processo reagem de forma muito sensível à perturbações ou manipulações de quaisquer variáveis. Para tanto, foram definidas três malhas de controle por realimentação ou *feedback* e uma malha de controle em cascata.

O objetivo deste trabalho é determinar as funções globais de transferências das três malhas de controle por realimentação, definir os controladores e sintonizar os seus parâmetros. As três funções de transferência desses três processos serão ajustados a partir das curvas-respostas em malha aberta. Essas funções serão então utilizadas como funções de transferências nas três malhas de controle e a método de sintonização dos parâmetros dos controladores será conduzidas algebricamente por tentativas.

### **3. Materiais e métodos**

#### **3.1 Materiais**

Foi empregado um notebook com processador Intel Core i3 com sistema operacional *Windows 7*. O ajuste das curvas foi realizado por meio do aplicativo *CurveExpert* versão 1.40 e os gráficos foram feitos com a planilha *Microsoft Excel*. As curvas respostas foram obtidas com o simulador do *Mini Spray-Dryer B-290* da *Büchi*, previamente desenvolvido por nosso grupo de pesquisa.

#### **3.2 Métodos**

Inicialmente são levantadas curvas-respostas em malha aberta de cada processo, através da aplicação de um degrau na variável manipulável. Essas curvas são então normalizadas de

modo que possam ser ajustadas a funções de primeira ou de segunda ordem. Essas funções são então empregadas como funções de transferência dos respectivos processos em malhas fechadas de controle por retroalimentação. As malhas fechadas são então simuladas a fim de se realizar testes de estabilidade e de sintonização dos parâmetros dos controladores. Nos processos de primeira ordem foram empregados controladores do tipo PI, a fim de se evitar a ocorrência de *offset*, e nos de segunda ordem foram utilizados controladores do tipo P, cuja função é tornar o sistema mais estável e amortecido. Essa estratégia tornou possível desenvolver soluções algébricas para todas as malhas de controle.

### 3.2.1 Ajuste à curva resposta em malha aberta

A malha aberta de um processo está representada pela Fig. 1, em que  $y'(s)$  é a variável manipulável e  $y(s)$  é a variável controlável.

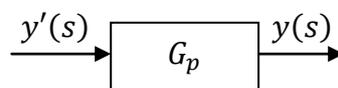


Fig.1 – Representação da malha aberta de um processo

#### 3.2.1.1 Curva-resposta de primeira ordem em malha aberta

A função de transferência de um processo de primeira ordem normalizado é dada por:

$$\text{Eq. 1} \quad G_P(s) = \frac{y(s)}{y'(s)} = \frac{\omega_p}{s + \omega_p}$$

Aplicando-se um degrau unitário na variável manipulável  $y'(s) = 1/s$  tem-se:

$$\text{Eq. 2} \quad y(s) = \frac{1}{s} \frac{\omega_p}{s + \omega_p}$$

A transformada inversa de Laplace  $\mathcal{L}^{-1}[y(s)] = y(t)$  então resulta:

$$\text{Eq. 3} \quad y(t) = 1 - e^{-\omega_n t}$$

, que corresponde a uma curva-resposta normalizada de primeira ordem.

#### 3.2.1.2 Curva-resposta de segunda ordem em malha aberta

A função de transferência de um processo de segunda ordem pode ser dada por:

$$\text{Eq. 4} \quad G_P(s) = \frac{y(s)}{y'(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Aplicando um degrau unitário na variável manipulável  $y'(s) = 1/s$  tem-se:

$$\text{Eq. 5} \quad y(s) = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

A transformada inversa de Laplace  $\mathcal{L}^{-1}[y(s)] = y(t)$  então resulta<sup>4,5</sup>:

- para o sistema subamortecido  $0 < \xi < 1$ :

$$\text{Eq. 6} \quad y(t) = 1 - e^{-\xi\omega_n t} \left( \cos \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} t + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \text{sen} \left( \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} t \right) \right)$$

- para o sistema criticamente amortecido  $\xi = 1$ :

$$\text{Eq. 7} \quad y(t) = 1 - e^{-\xi\omega_n t} (1 + \omega_n t)$$

- para o sistema sobreamortecido  $\xi > 1$ :

$$\text{Eq. 8} \quad y(t) = 1 + \frac{\left( \xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right) e^{-\left( \xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \omega_n t} - \left( \xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right) e^{-\left( \xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \omega_n t}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}}$$

, que correspondem às curvas-respostas normalizadas de segunda ordem para cada caso.

### 3.2.2 Sintonização do sistema de controle em malha fechada

A malha fechada do sistema de controle de retroalimentação está representada pela Fig.2, em que  $y_{sp}(s)$  é a variável de ajuste ou *setpoint*,  $y'(s)$  é a variável manipulada e  $y(s)$  é a variável controlada.

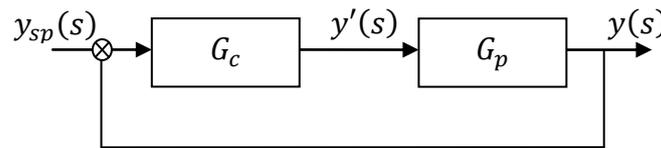


Fig.2 – Representação da malha fechada de controle do processo

#### 3.2.2.1 Malha de controle PI para processos de primeira ordem

A função de transferência do sistema em malha fechada do processo da Eq. 1, com controlador proporcional PI,  $G_c = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$ , resulta:

$$\text{Eq. 9} \quad G_F(s) = \frac{y(s)}{y_{sp}(s)} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} = \frac{K_c \omega_p (s + 1/\tau_i)}{s^2 + \omega_p (1 + K_c) s + K_c \omega_p / \tau_i}$$

Aplicando um degrau unitário na variável  $y_{sp}(s) = 1/s$  resulta:

$$\text{Eq. 10} \quad y(s) = K_c \omega_p \frac{1}{s} \frac{(s + 1/\tau_i)}{s^2 + \omega_p (1 + K_c) s + K_c \omega_p / \tau_i} = K_c \omega_p \frac{1}{s} \frac{(s + 1/\tau_i)}{(s + p_1)(s + p_2)}$$

, e expandindo a equação característica em frações parciais tem-se:

$$\text{Eq. 11} \quad y(s) = \frac{1}{s} + \frac{p_2(p_1\tau_i - 1)}{(p_2 - p_1)} \frac{1}{(s + p_1)} + \frac{p_1(1 - p_2\tau_i)}{(p_2 - p_1)} \frac{1}{(s + p_2)}$$

, em que  $p_1, p_2$  são números complexos e pares conjugados dados por:

$$\text{Eq. 12} \quad p_1, p_2 = \frac{\omega_p(1+K_c)}{2} \pm j \sqrt{\frac{4K_c\omega_p/\tau_i - \omega_p^2(1+K_c)^2}{2}} = \alpha \pm j\beta$$

Substituindo-se na Eq. 11 resulta<sup>4,5</sup>:

$$\text{Eq. 13} \quad y(s) = \frac{1}{s} + \frac{\frac{1}{2} - \frac{(\alpha^2 + \beta^2)\tau_i - \alpha}{2\beta}j}{(s+p_1)} + \frac{\frac{1}{2} + \frac{(\alpha^2 + \beta^2)\tau_i - \alpha}{2\beta}j}{(s+p_2)}$$

, e aplicando-se a transformada de Laplace  $\mathcal{L}^{-1}[y(s)] = y(t)$  tem-se:

$$\text{Eq. 14} \quad y(t) = 1 - 2\sqrt{\frac{1}{2^2} + \left(\frac{(\alpha^2 + \beta^2)\tau_i - \alpha}{2\beta}\right)^2} e^{-\alpha t} \cos(\beta t)$$

### 3.2.2.2 Malha de controle P para sistemas de segunda ordem

A função de transferência do sistema em malha fechada do processo da Eq. 4, com controlador P,  $G_c = K_c$ , resulta:

$$\text{Eq. 15} \quad G_F(s) = \frac{y(s)}{y_{sp}(s)} = \frac{G_c G_P}{1 + G_c G_P} = \frac{K_c \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + (1 + K_c) \omega_n^2}$$

Aplicando-se um degraú unitário na variável  $y_{sp}(s) = 1/s$  tem-se:

$$\text{Eq. 16} \quad y(s) = K_c \omega_n^2 \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + (1 + K_c) \omega_n^2} = K_c \omega_n^2 \frac{1}{s(s+p_1)(s+p_2)}$$

, e expandindo a equação característica em frações parciais resulta<sup>4,5</sup>:

$$\text{Eq. 17} \quad y(s) = \frac{K_c \omega_n^2}{p_1 p_2} \left[ \frac{1}{s} - \frac{p_2}{(p_2 - p_1)(s+p_1)} + \frac{p_1}{(p_2 - p_1)(s+p_2)} \right]$$

, em que  $p_1, p_2$  são números complexos e pares conjugados:

$$\text{Eq. 18} \quad p_1, p_2 = \xi \omega_n \pm j \sqrt{(1 + K_c) \omega_n^2 - \xi \omega_n^2} = \alpha \pm j\beta$$

Substituindo-se na Eq. 17 tem-se:

$$\text{Eq. 19} \quad y(s) = \frac{K_c \omega_n^2}{p_1 p_2} \left[ \frac{1}{s} - \frac{\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{2\beta}j}{(s+p_1)} - \frac{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\beta}j}{(s+p_2)} \right]$$

Aplicando-se a transformada de Laplace  $\mathcal{L}^{-1}[y(s)] = y(t)$  resulta:

$$\text{Eq. 20} \quad y(t) = 1 - 2\sqrt{\frac{1}{2^2} + \left(\frac{\alpha}{2\beta}\right)^2} e^{-\alpha t} \cos(\beta t)$$

## 4. Resultados

### 4.1 Ajuste do processo $\omega_l \times nv$ e sintonização dos parâmetros do controlador

A malha aberta foi submetida a um degrau na variável manipulada  $n_v(t)$  de 2,5 para 3,5, resultando numa resposta de primeira ordem da variável controlada  $w_l(t)$ , conforme mostra a Fig. 3. A curva-resposta foi normalizada a fim de ser ajustada pela Eq. 3 e está apresentada na Fig. 4.

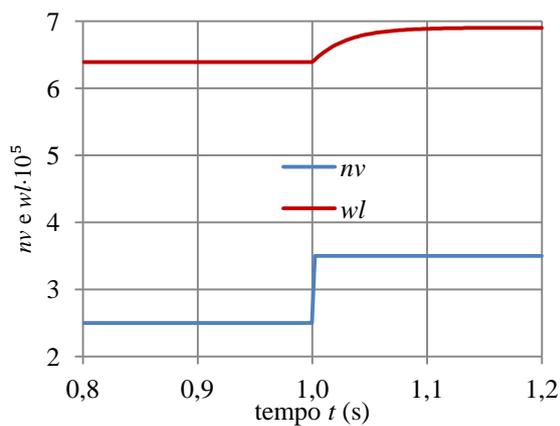


Fig. 3 – Resposta de primeira ordem ao degrau

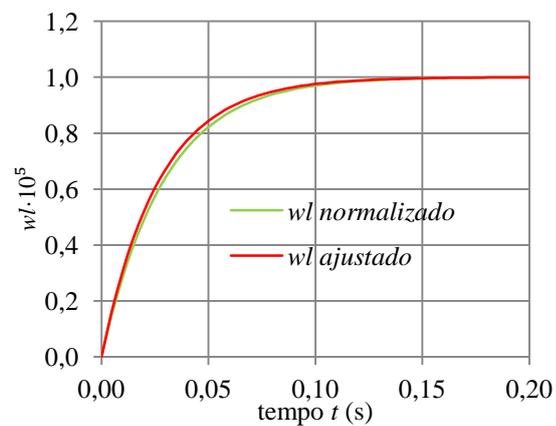


Fig. 4 – Ajuste da curva resposta de primeira ordem

O ajuste da Eq. 3 foi realizado com o aplicativo *curve expert*, e o valor do parâmetro obtido foi  $\omega_p = 37,15$ . O controlador proporcional P é pouco recomendável para um sistema de primeira ordem devido à resposta lenta e a ocorrência de *offset*. Dessa forma, adotou-se o controlador PI para esse processo. A sintonização dos parâmetros foi realizada por tentativa e erro, tendo sido obtidos os resultados mostrados na Fig. 5 e 6.

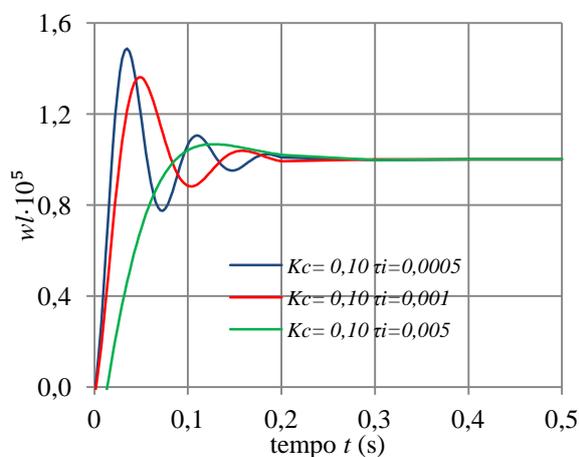


Fig. 5 – Resposta em malha fechada em função de  $\tau_i$

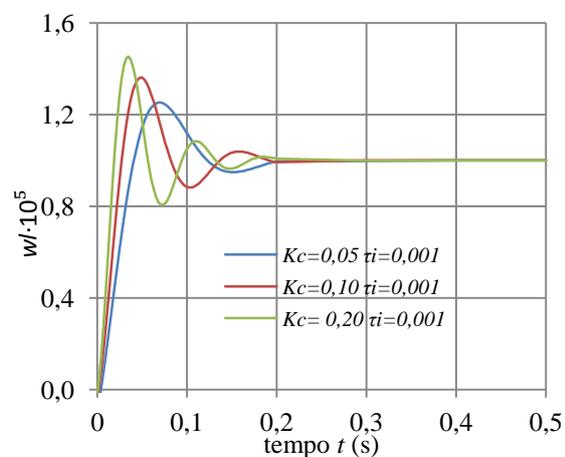


Fig. 6 – Resposta em malha fechada em função de  $K_c$

Valores crescentes de  $\tau_i$  foram inicialmente testados para  $K_C = 10$  constante, conforme mostra a Fig. 5. O melhor valor obtido foi  $\tau_i = 0,001$  que corresponde a um *overshoot* de 0,36 e uma razão de decaimento de 0,107. Valores menores de  $\tau_i$  produzem respostas muito rápidas, com oscilações excessivas, e de grande amplitude, enquanto que valores maiores produzem respostas amortecidas e muito lentas. Valores crescentes de  $K_C$  foram então testados com  $\tau_i = 0,001$  constante. O melhor resultado obtido foi  $K_C = 20$ , devido à resposta rápida com *overshoot* de 0,25 e sem a ocorrência de um segundo pico. Não foi observada a ocorrência de *offset*.

#### 4.2 - Ajuste do processo $\omega_l$ x $L_v$ e sintonização dos parâmetros do controlador

A malha aberta foi submetida a um degrau na variável manipulada  $L_v(t)$  de 50 para 60, resultando numa resposta de primeira ordem da variável controlada  $w_l(t)$ , conforme mostra a Fig. 7. A curva-resposta foi normalizada a fim de ser ajustada pela Eq. 3 e está apresentada na Fig. 8.

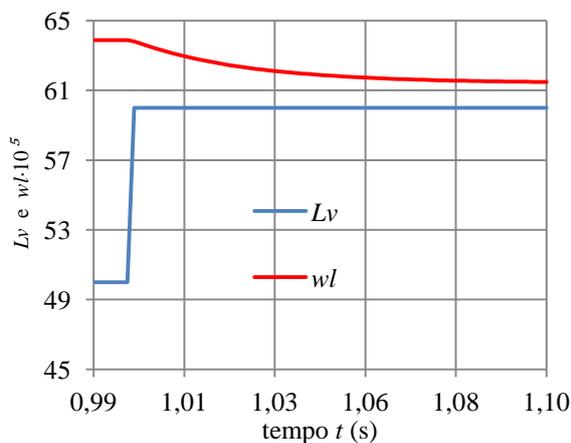


Fig. 7 – Resposta de  $w_l$  ao degrau em  $L_v$

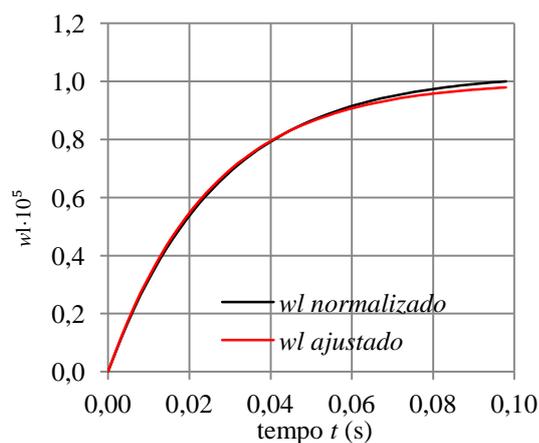


Fig. 8 – Ajuste de primeira ordem à curva normalizada

O ajuste da Eq. 3 foi realizado com o aplicativo *curve expert*, e o valor do parâmetro obtido foi  $\omega_p = 39,59$ . O controlador proporcional P é pouco recomendável também neste caso. Dessa forma, adotou-se novamente o controlador PI para esse processo. A sintonização dos parâmetros foi realizada por tentativa e erro, tendo sido obtidos os resultados mostrados na Fig. 9 e 10.

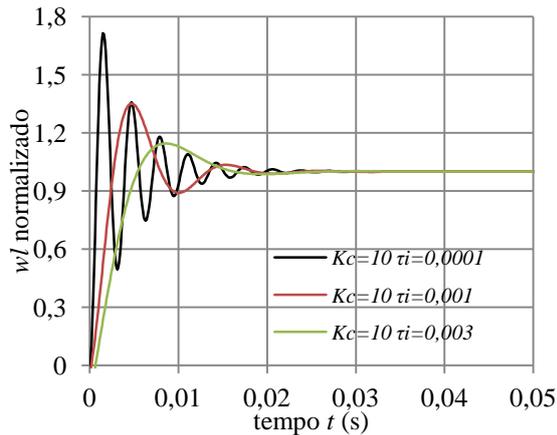


Fig. 9 – Sintonização de  $\tau_i$

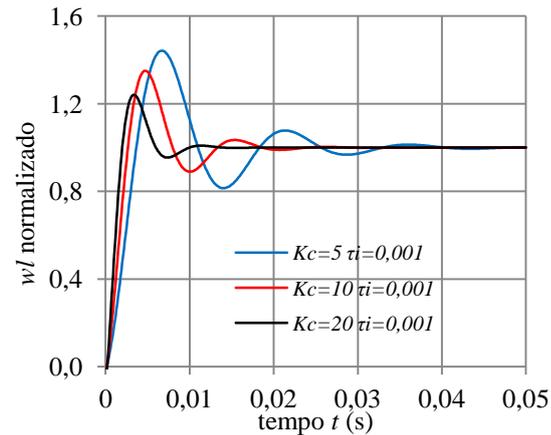


Fig. 10 – Sintonização de  $K_c$

Valores crescentes de  $\tau_i$  foram testados para  $K_c = 10$  constante, conforme mostra a Fig. 9, sendo que o melhor valor obtido foi  $\tau_i = 0,001$ . Nesse caso, o *overshoot* é de 0,35 e a razão de decaimento de 0,1. Valores menores de  $\tau_i$  produzem também respostas rápidas, mas com oscilações de grande amplitude, enquanto que valores maiores produzem respostas amortecidas e muito lentas. Valores crescentes de  $K_c$  foram então testados com  $\tau_i = 0,001$  constante, conforme mostra a Fig. 10. O melhor resultado foi obtido com  $K_c = 20$ , cuja resposta é rápida com *overshoot* de 0,24 e razão de decaimento de 0,033. Não foi observada a ocorrência de *offset*.

#### 4.3 - Ajuste do processo $D_{32} \times L_r$ e sintonização do parâmetro do controlador

A malha aberta foi submetida a um degrau na variável manipulável  $L_r(t)$  de 30 para 50, resultando na resposta oscilatória e subamortecida da variável controlável  $D_{32}(t)$ , conforme mostra a Fig. 11. A curva-resposta foi então normalizada e ajustada pela Eq. 3.

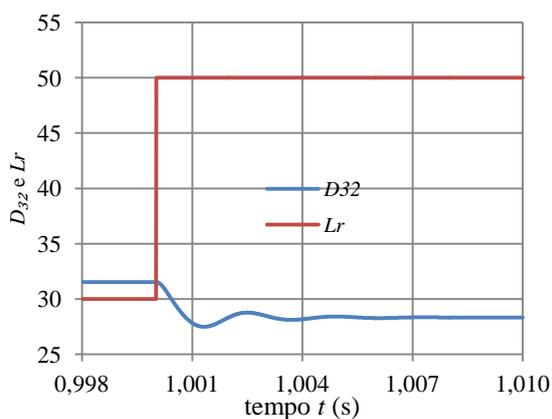


Fig. 11 – Resposta de  $D_{32}$  ao degrau em  $L_r$

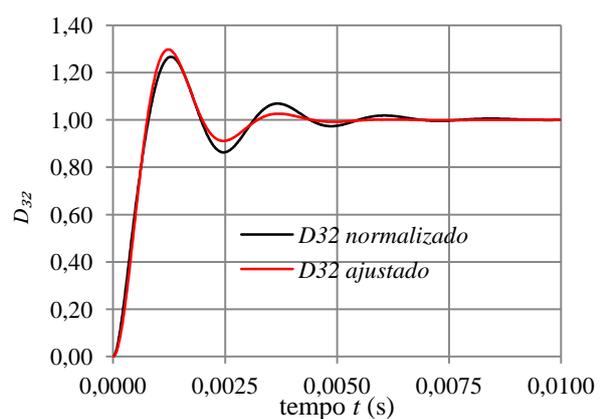


Fig. 12 – Ajuste de segunda ordem à curva normalizada

O ajuste da Eq. 6 foi realizado com o aplicativo *curve expert*, e os valores dos parâmetros obtidos foram  $\xi_n = 0,36$  e  $\omega_n = 2735$ . O controlador proporcional P foi escolhido, devido à característica oscilatória do processo de segunda ordem e a ausência de *offset*. Dessa forma, adotou-se o controlador P para esse processo. A sintonização do parâmetro foi realizada por tentativa e erro, tendo sido obtido os resultados mostrados na Fig. 13.

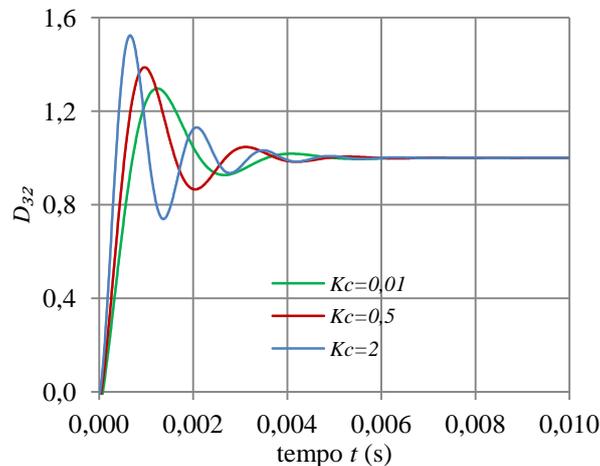


Fig. 13 – Sintonização de  $K_c$

Valores crescentes de  $K_c$  foram testados, sendo que o melhor resultado foi com  $K_c = 0,01$ . Nesse caso, o *overshoot* é de 0,297 e a razão de decaimento é de 0,06. Valores maiores de  $\tau_i$  produzem respostas muito rápidas e oscilantes. Não foi observada a ocorrência de *offset*.

## 5. Conclusões

O ajuste das curvas-respostas com funções de primeira e segunda ordem foram bem sucedidas e a aplicação de controladores do tipo PI e P permitiu um controle simples e eficiente, cujos resultados puderam ser avaliados através de tratamento basicamente algébrico. A técnica de representação da função de transferência dos processos através de suas curvas-respostas se mostrou muito eficaz, especialmente quando obtidas experimentalmente ou para sistemas não lineares. Os resultados obtidos podem agora ser aplicados ao sistema de controle do simulador previamente desenvolvido para processo de *spray cooling*.



## 6. Divulgação dos Resultados

Os resultados deste trabalho serão divulgados através da participação em palestras e congressos, ou através da submissão na forma de artigos científicos a revistas nacionais ou internacionais.

### Referências

- [1] Parikh, D. M. “Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology” *CRC Press*, 3ª edição, Boca Raton, 2010.
- [2] Parikh, D. M. “How to Optimize Fluid Bed Processing Technology” *Academic Press, Elsevier*, San Diego, 2017.
- [3] Ashgriz N. *Handbook of Atomization and Sprays* [Livro]. - New York : Springer Science, 2011.
- [4] Bequette, W. B. “Process Control Modeling, Design and Simulation” *Prentice Hall*, New Jersey, 2003.
- [5] Corriou, J. P. “Process Control Theory and Application” *Springer Science*, London, 2004