

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

MODELAGEM E CONTROLE DE UM TROCADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÊNTRICOS

Iago de Sousa Ferreira da Silva¹ – iagosfsilva@gmail.com

Luzia Aguiar de Medeiros¹ – Luzia.agm@gmail.com

Ingrid Freitas Assad¹ – ingridfreitasassad@gmail.com

Izabela Guimarães Ribas¹ – izabela.ribas.eq@gmail.com

¹ Instituto Federal do norte de Minas Gerais – Campus Montes Claros, Minas Gerais, Brasil

Resumo. *O presente trabalho apresenta um estudo da análise do comportamento e do controle de um trocador de calor de tubos concêntricos. Foram feitas simulações utilizando a ferramenta xcos so software livre Scilab. Foi encontrado a função de transferência do processo e foi utilizado o controlador PID. A análise de sintonia foi feita utilizando o critério de estabilidade de Routh-Hurwitz, para a sintonia utilizou-se o método ultimate gain e para a sintonia fina foi escolhido o método de análise de desempenho ISE. Neste trabalho são encontrados os resultados para as análises feitas.*

Palavras-chave: *Modelagem de trocador de calor, Controle de Processos, Controle PID*

1. INTRODUÇÃO

Uma forma de analisar um processo ou equipamento para obter resultados rápidos e seguros sem a realização de testes em uma planta real, consiste na utilização de modelos matemáticos. Essa representação através de equações matemáticas é conhecida como modelagem de processos. Quanto maior a aproximação da realidade, mais complexas serão as equações matemáticas obtidas (BURDEN & FAIRES, 2010).

Define-se processo como “qualquer operação ou sequência de operações realizada sobre um ou mais materiais visando sua energia, composição, dimensão ou qualquer outra propriedade física ou química (GARCIA, 2005). Controlar um processo é fazer com que as grandezas físicas envolvidas neste processo interajam entre si de maneira ordenada, respeitando os limites definidos no projeto e dentro de um período de tempo determinado.

As principais grandezas envolvidas são: temperatura, umidade, pressão atmosférica, posição, vibrações, campos perturbadores. Quando começamos um projeto de controle de processo, temos que levar em consideração principalmente quando, quanto e como mudar o valor de uma destas grandezas.

E com o intuito de facilitar o trabalho de modelamento admite-se o termo sistema para definir um processo ou um equipamento a ser modelado. Os sistemas são normalmente

representados por diagramas de blocos que representam os elementos de controle e o processo. Cada bloco desse diagrama é descrito por uma função de transferência. Essa função de transferência apresenta a relação de “causa e efeito” entre as variáveis de processo envolvidas na representação matemática de um sistema (ESTEVEVES, 2009).

Segundo Esteves (2009) o conhecimento do comportamento dinâmico de um processo é muito útil para selecionar o tipo de controlador e seus ajustes mais adequados. Esse conhecimento normalmente deve ser traduzido na forma de um modelo do processo, que é o primeiro passo na análise de um sistema de controle. Uma vez obtido tal modelo, existem vários métodos disponíveis para a análise do desempenho do sistema.

A modelagem tem a vantagem de detalhar por completo a modelo o comportamento dinâmico. Por outro lado, num caso mais real, determinar todos os fenômenos intrínsecos do sistema, pode transformá-la em alta complexidade para este tipo de análise. Uma vez determinado o modelo do processo, a resolução numérica das equações permite determinar os valores que as variáveis de saída deverão adotar em diferentes condições de operação.

Dado um processo em que se faz necessário controlar os parâmetros que o influenciam para atingir e uniformizar os resultados, a modelagem do mesmo torna-se indispensável. A partir da modelagem, têm-se funções de transferência, que representam cada elemento utilizado para controle. A sintonia de um controle é importante, pois se trata da obtenção dos parâmetros utilizados no controlador PID.

Define-se trocador de calor como equipamento usado para realizar a troca térmica entre dois fluidos que se encontram em diferentes temperaturas. Este processo de troca térmica é bastante comum em muitas aplicações da Engenharia Química. Pode-se utilizá-lo no aquecimento e/ou resfriamento de ambientes, no condicionamento de ar, na produção de energia, na recuperação de calor, nos processos químicos de uma maneira geral, em radiadores de automóveis em veículos espaciais.

Os trocadores de calor são equipamentos que provêm o fluxo de energia térmica entre dois ou mais fluidos em diferentes temperaturas. Estes equipamentos são usados em uma ampla variedade de aplicações, que incluem produção de energia, indústrias de processos, química e de alimentos, eletrônicos, engenharia ambiental, recuperação de calor desperdiçado, indústria de manufatura; ar condicionado, refrigeração e aplicações espaciais.

O presente trabalho visa verificar o comportamento do processo em um trocador de calor com a variável de interesse a temperatura fria de saída, frente as perturbações, bem como estabelecer as variáveis controladas e manipuladas, e a determinação das respectivas funções de transferência $G_d(s)$ e $G_p(s)$, e realizar análise de estabilidade e sintonia em um sistema que contém trocador de calor de tubos concêntricos, equipamento este que possibilita a troca de calor entre dois fluidos de temperaturas diferentes, objetivando neste caso o controle da temperatura de saída do fluido frio.

2. METODOLOGIA

The paper must be written in English, Portuguese or Spanish. *If written in Portuguese or Spanish, a translation of title, abstract and keywords into English must be provided at the end of the paper (after the reference list).*

2.1 Modelagem matemática

O trocador de calor utilizado é do tipo tubo concêntricos em contracorrente, em que o fluido frio passa no casco e o fluido quente nos tubos, como segue a figura 1.

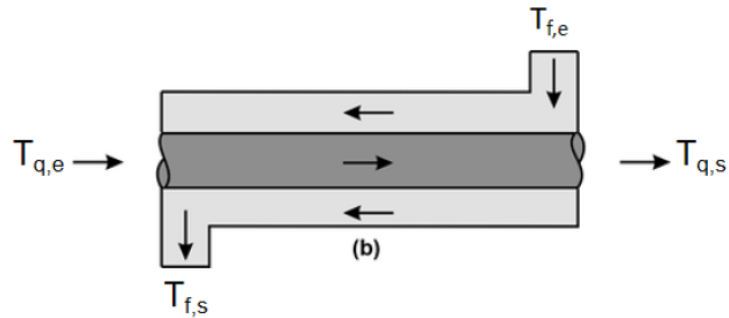


Figura 1: Trocadores de calor com tubos concêntricos (CDC equipamentos)

As variáveis controlada, manipulada, distúrbios e parâmetros, são:

Variável controlada: Temperatura fria de saída

Variável manipulada: Vazão quente de entrada

Distúrbios: Temperatura quente de entrada, quantidade de calor trocada

Parâmetros: Densidade e capacidade calorífica

O volume foi considerado constante e a diferença de temperatura foi considerada pequena, de modo que a densidade e a capacidade calorífica podem ser dadas como o valor correspondente ao da média das temperaturas de entrada e saída.

2.2 Modelagem matemática

Balço de massa:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho F_{q,e} - \rho F_{q,s} \quad (1)$$

$$\frac{d(V)}{dt} = \rho F_{q,e} - \rho F_{q,s} \quad (2)$$

Logo, no estado estacionário:

$$F_{q,e} = F_{q,s} = F \quad (3)$$

Balço de energia:

$$\frac{d(\rho V C_p T)}{dt} = \rho F C_p T_0 - \rho F C_p T + Q \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} (T_0 - T) + \frac{Q}{\rho V C_p} \quad (5)$$

Reescrevendo o balanço de energia na forma padrão de uma equação diferencial e passando para variável desvio tem-se:

$$\frac{V}{F} \frac{dT'}{dt} + T' = T'_0 + \frac{Q}{\rho F C_p} \quad (6)$$

Reescrevendo o balanço de energia na forma padrão de uma equação diferencial e passando para variável desvio tem-se:

$$\frac{V dT'}{F dt} + T' = T'_0 + \frac{Q}{\rho F C_p} \quad (7)$$

Os balanços obtidos foram implementados Xcos do software livre Scilab, como mostrado na figura 2

Foram selecionados os seguintes valores para as variáveis da equação de balanço de energia: $F = 0,02$, $V = 1 \text{ m}^3$, $T_0 = 293 \text{ K}$, $Q = 3000 \text{ W}$, $C_p = 4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ e $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

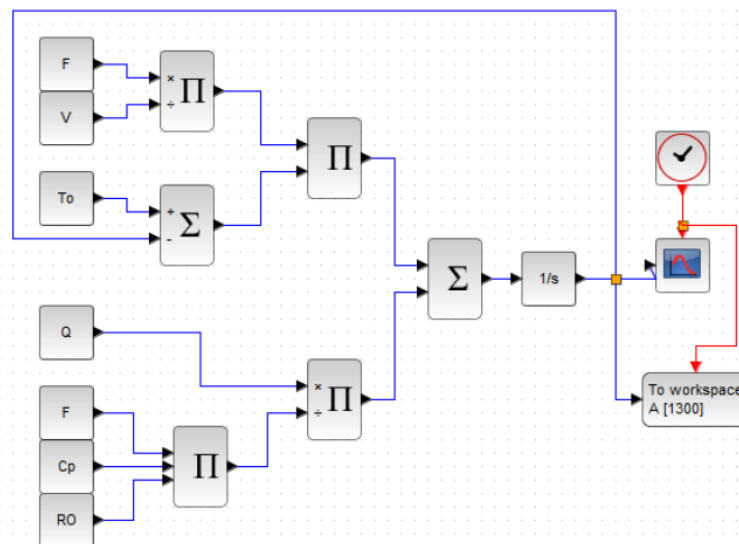


Figura 2: Fluxograma do balanço obtido

2.3 Estabilidade

O critério de estabilidade escolhido para analisar a estabilidade do processo foi o de Routh-Hurwitz, que consiste em analisar se há polos positivos na equação característica.

2.4 Sintonia

Para a sintonia do processo foi escolhido o método de Astrom-Hägglund, Esse método é conhecido também como auto sintonia pois consiste em forçar a oscilação sustentada através de um relé e então obter a constante proporcional crítica (K_{cc}) e com a tabela do método Ultimate Gain encontrar quais seriam os valores iniciais dos parâmetros do controle.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foi colocado o valor zero como estado inicial no bloco que representa a integração, para que fosse gerada uma janela gráfica com a resposta para $T_0 = 293 \text{ K}$ e $Q=3000 \text{ W}$, que são os valores do estado estacionário sem nenhuma perturbação.

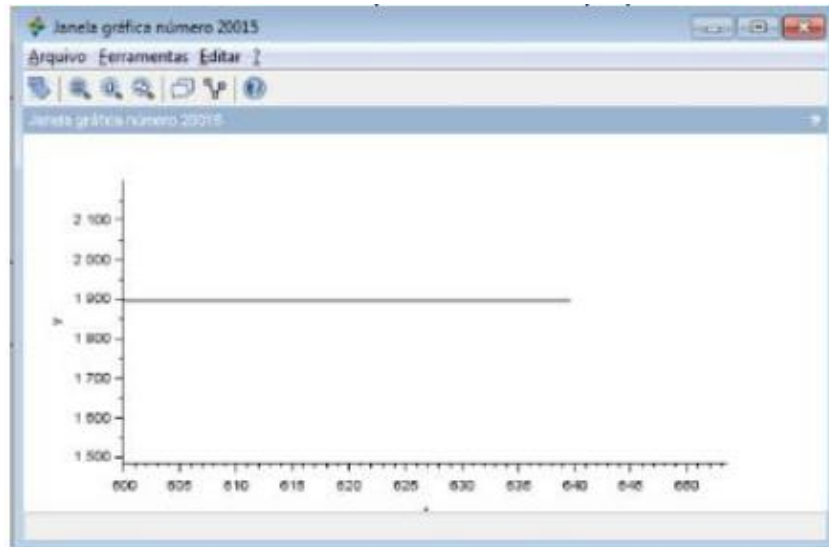


Figura 3: Gráfico de temperatura em função do tempo no estado estacionário do processo.

Para avaliar como a temperatura inicial e a quantidade de calor fornecido influenciam na temperatura final, foram feitas quatro perturbações em cada um desses distúrbios, sendo elas dois aumentos de 20 e 40% do valor inicial e duas diminuições, também de 20 e 40% do valor inicial.

A partir da janela gráfica do próprio Xcos, é possível verificar o comportamento dessas perturbações individualmente, portanto para fins de comparação, os pontos gerados pelo programa foram passados para o Excel, onde foi possível plotar as curvas com e sem distúrbios.

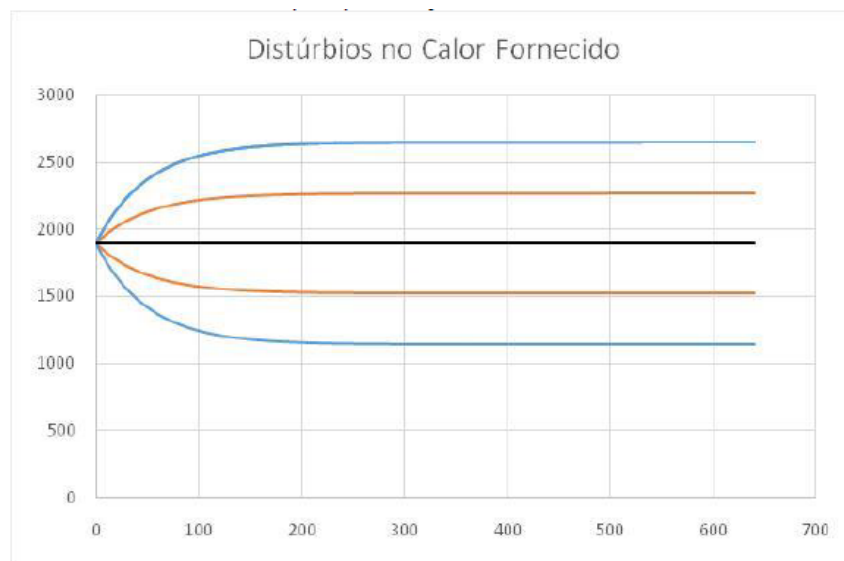


Figura 4: Gráfico referente as perturbações no calor fornecido

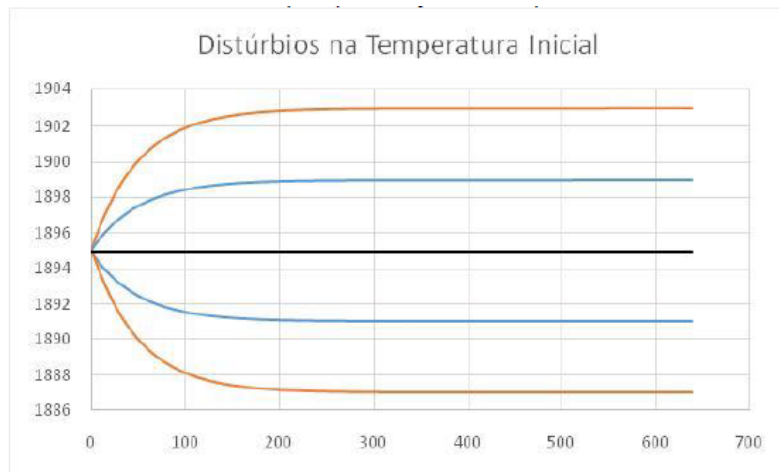


Figura 5: Gráfico referente as perturbações na temperatura inicial

Através desses gráficos, foi possível analisar paralelamente a influência das quatro perturbações de cada distúrbio e também verificar que a equação é linear, uma vez que os aumentos e diminuições foram simétricos e proporcionais.

No momento em que cada curva tende à estabilidade, define-se um novo estado estacionário proveniente do equilíbrio do sistema após a mudança, e a nova temperatura desse estado pode ser identificada no próprio gráfico. Com este valor, é possível achar a constante que representa o ganho do sistema com aquela modificação, K_p , e conseqüentemente a constante de tempo, τ .

Para a variação da temperatura inicial $K_p=1^\circ C$.

Para a variação de calor inicialmente fornecido:

$$K_p = \frac{1}{F\rho C_p} = \frac{1}{0,02 \cdot 1000 \cdot 4} = 0,0125 \frac{s^2 K}{kg m^2} \quad (8)$$

A constante de tempo é a mesma para os dois distúrbios:

$$\tau = \frac{V}{F} = \frac{1}{0,02} = 50 s \quad (9)$$

Tem-se que as funções de transferência G_1 e G_2 são de primeira ordem e assumem a forma geral $G = \frac{K_p}{\tau s + 1}$. Substituindo os valores encontrados para as constantes de ganho e tempo, definem-se as funções de transferência individuais e global:

$$G_1 = \frac{T'(s)}{T_0'(s)} = \frac{1}{50s + 1} \quad (10)$$

$$G_2 = \frac{T'(s)}{Q'(s)} = \frac{0,0125}{50s + 1} \quad (11)$$

$$G = T'(s) = \frac{1}{50s + 1} T_0'(s) + \frac{0,0125}{50s + 1} A = Q'(s) \quad (12)$$

Para estabilidade, foi utilizado o critério de Routh. Pelo fato desse critério não ser preciso resolver a equação característica para encontrar os intervalos de K_c , optou-se pela escolha desse método. Após construir a matriz, as condições para a estabilidade foram:

$$K_c > 0$$

$$K_c > \frac{-50}{0,0125\tau_D}$$

Para a sintonia do processo foi escolhido o método de Astrom-Hägglund devido ao fato de ser um processo de primeira ordem e sem tempo morto. Esse método é conhecido também como

auto sintonia pois consiste em forçar a oscilação sustentada através de um relé e então obter a constante proporcional crítica (K_{cc}) e com a tabela do método Ultimate Gain encontrar quais seriam os valores iniciais dos parâmetros do controle. Foi implementada no Xcos a malha fechada, inicialmente com o relé, como se segue na Figura 6:

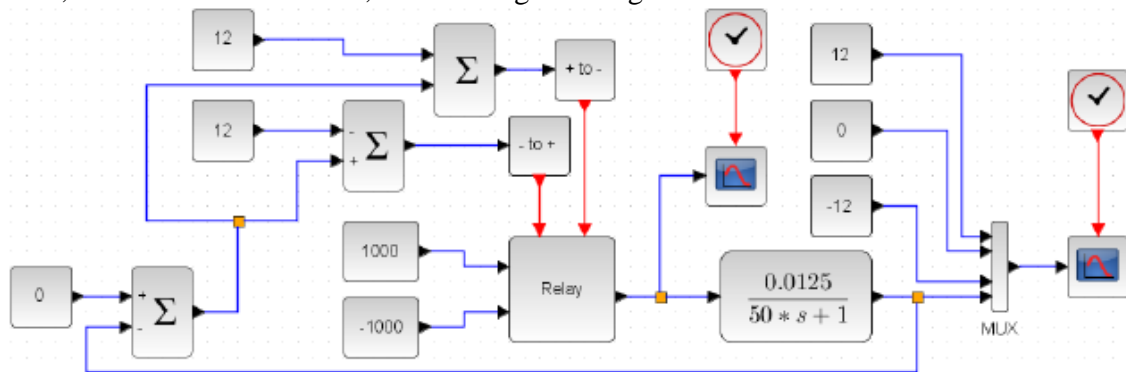


Figura 6: Fluxograma da malha fechada com relé

Com valor de 3000 W, foi induzida uma variação de 1000 W e -1000 W no calor fornecido ao fluido do trocador de calor. Com um ganho de 0,0125 na função de transferência do processo, é produzida uma resposta oscilatória entre 12,5 e -12,5 para a temperatura de saída. Para limitar o relé, foram escolhidos os valores 12 e -12 pois estão próximos aos valores que seriam os pontos de maior e menor amplitude das ondas com inércia. Desse modo, quando a resposta chega a um dos valores limitantes, sua direção muda.

A variação induzida do calor está representada nos blocos que entram no Relay e os valores limitantes do erro entram nos somatórios. São gerados dois gráficos, um pelo bloco que está obtendo a resposta do relé (Figura 7) e outro pela resposta final do processo (Figura 8). Foram introduzidas as constantes 12, 0 e -12 no gráfico da resposta final para fins de comparação.

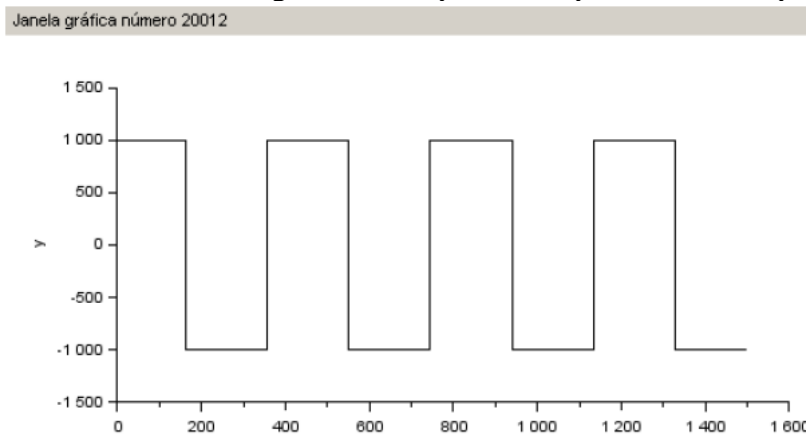


Figura 7: Variação forçada de calor

No gráfico da variação de calor (Figura 7) é possível verificar que a amplitude da sequência de degraus tem valor de 2000. E no gráfico da variação da temperatura de saída (Figura 8), a amplitude das ondas tem valor de 24.

Dessa forma, calcula-se o K_{cc} :

$$K_{cc} = \frac{4+d}{\pi \cdot a} \tag{13}$$

$$d = 1000$$

$$a = 12$$

$$K_{cc} = 106,1$$

Janela gráfica número 20015

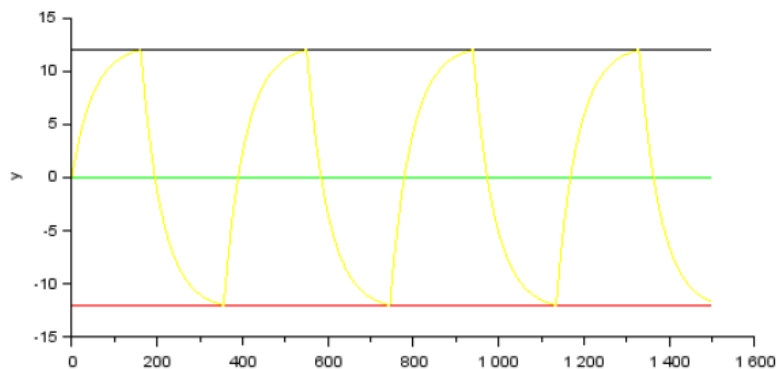


Figura 8: Resposta da variação da temperatura de saída

Com os gráficos (Figuras 7 e 8) também é possível saber o período das oscilações, T_c , que tem valor igual a 389,5 unidade de tempo

Os valores dos parâmetros do método ultimate gain estão dispostos na tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros do método Ultimate gain para o controlador PID

| K_c | K_1 | τ_D |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| $0,6 * K_{c_c}$ | $\frac{2}{T_c}$ | $\frac{T_c}{8}$ |

Fonte: (Stephanopoulos, 1984)

Portanto:

$$K_c = 63,7$$

$$K_1 = 0,0051$$

$$\tau_D = 48,7$$

Com os valores dos parâmetros, foi montado como superbloco o controle PID, como mostra a figura 9.

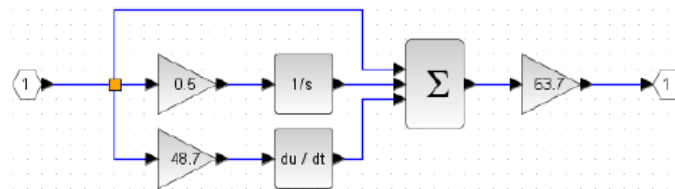


Figura 9: Malha do controle PID

O controle foi inserido na malha fechada no lugar do relé e foi acrescentada a função de transferência do distúrbio (Figura 10), obtendo como resposta o gráfico da figura 11.

Com essa versão da malha fechada, é possível fazer a sintonia fina. Foi escolhido o método de análise de desempenho ISE, pois o processo de mudança de temperatura, além de não ser instantâneo, demora a ser percebido pelo sensor. Para verificar a nota do ISE foram introduzidos blocos que correspondem a integral a partir do erro e do tempo (Figura 12):

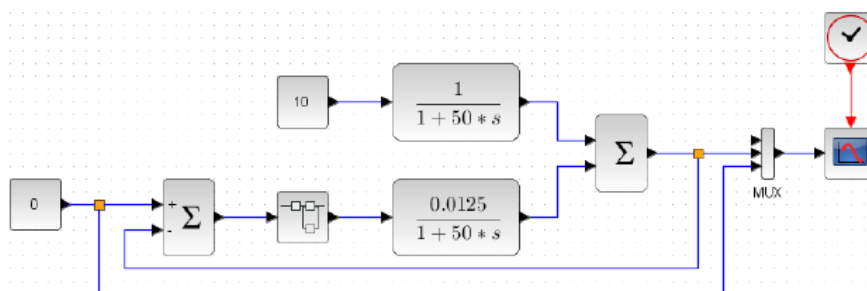


Figura 10: Malha fechada com controle PID

Janela gráfica número 20014

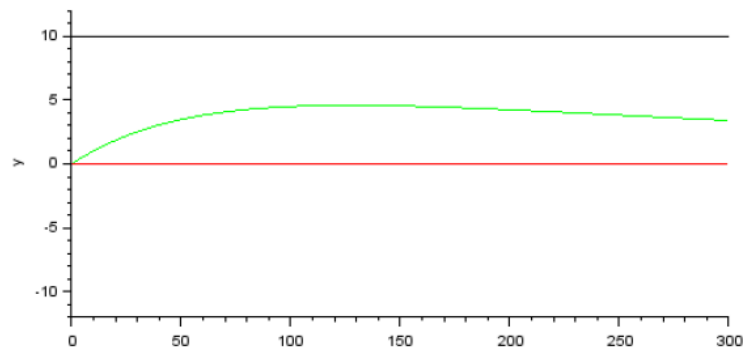


Figura 11: resposta do processo com controle PID

Com essa versão da malha fechada, é possível fazer a sintonia fina. Foi escolhido o método de análise de desempenho ISE, pois o processo de mudança de temperatura, além de não ser instantâneo, demora a ser percebido pelo sensor. Para verificar a nota do ISE foram introduzidos blocos que correspondem a integral a partir do erro e do tempo (Figura 12):

$$ISE = \int_0^t \text{erro}^2 dt \quad (14)$$

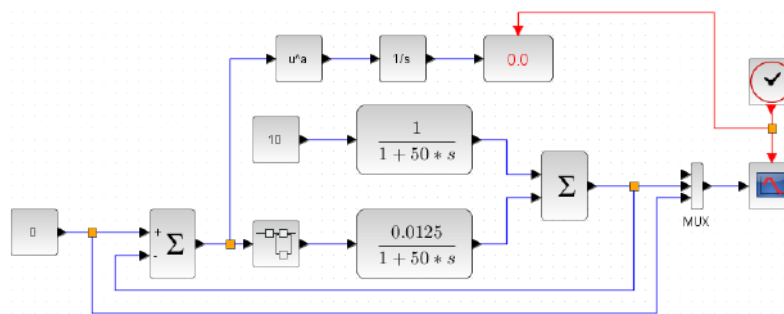


Figura 12: Malha fechada com controle PID e análise de desempenho

Portanto, os valores obtidos após a implementação no software, ideais para os parâmetros de controle PID foram:

$$\begin{aligned} K_c &= 80 \\ K_1 &= 10 \\ K_D &= 53 \end{aligned}$$

4. CONCLUSÕES

Através da análise de estabilidade encontrou-se o intervalo de K_c e realizando a sintonia foi possível encontrar o valor exato do mesmo, logo, o método aplicado foi adequado.

REFERÊNCIAS

- BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. (2010), "Numerical Analysis". 9. ed. Boston, Massachusetts: Brooks/Cole, Cengage Learning.
- CDC Equipamentos. "Tipos de Trocador de Calor". Disponível em: <<http://www.cdcequipamentos.com/tipos-de-trocador-de-calor.html>> Acesso em: novembro/2017.
- ESTEVES, A.C. (2009), "Estudo comparativo do desempenho de um modelo fenomenológico e de um modelo físico a um trocador de calor", São Caetano do Sul, SP, Escola de Engenharia de Mauá, 2009.

- GARCIA, C. (2005), “Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos”. São Paulo, SP. 678p.
- KREITH, Frank. (1969), Princípios da transmissão de calor, São Paulo, SP, Edgard Blucher, 641p.
- STEPHANOPOULOS, G. (1984), “Chemical process control: an introduction to theory and practice”. New Jersey: Prentive Hall.

MODELING AND CONTROL A HEAT EXCHANGER OF CONCENTRIC TUBES

Abstract. *The present work presents a study of the behavioral and control analysis of a concentric tube heat exchanger. Simulations were done using the xcos tool and Scilab free software. The process transfer function was found and the PID controller was used. The tuning analysis was done using the Routh-Hurwitz stability criterion, for the tuning, the ultimate gain method was used, and for fine tuning the ISE performance analysis method was chosen. In this work are found the results for the analyzes made..*

Keywords: *Heat Exchanger Modeling, Process Control, PID Control*