

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

CONTROLE E DINÂMICA DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO-TUBO ATRAVÉS DE ANÁLISE EM MALHA FECHADA

Rosilanny Soares Carvalho¹ – rosilannysoares@hotmail.com
Marcelo Abraão Barbosa de Freitas¹ – abr_freitas@hotmail.com
Shara Katerine Moreira Leal² – sharaengquim@hotmail.com
Daiane Antunes Pinheiro¹ – daianengquimica@gmail.com
Vitor Soares¹ – vitorsoaresengquim@gmail.com

¹Instituto Federal do Norte de Minas – Montes Claros, MG, Brasil

²Universidade Federal do Rio de Janeiro– Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo. O controle automático aplicado em processos mantém as variáveis como temperatura, pressão, fluxo, entre outras, em um determinado valor operacional desejado. Tendo em vista que alterações sempre estão presentes nos processos e que se em resposta a isso nenhuma correção for aplicada, a qualidade do produto, a taxa de produção entre outros parâmetros não atingirão as condições desejadas, afetando assim a segurança e o rendimento do processo. Diante disto, o presente trabalho tem como objetivo selecionar o tipo de controlador que melhor se adéqua ao trocador de calor-casco tubo em escoamento paralelo, estimar os valores das constantes de controle e por fim verificar a estabilidade de um trocador de calor casco-tubo e selecionar o tipo de controlador que melhor se adéqua ao mesmo.

Palavras-chave: Controle, Malha Fechada, Simulação, Trocador de Calor.

1. INTRODUÇÃO

Trocador de calor, é um equipamento que implementa o processo de troca de calor entre dois fluidos que estão em diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida. Os trocadores de calor têm vasta aplicabilidade tanto em aquecimento de ambientes, na produção de potência, na recuperação de calor em um processo bem como em processamentos químicos (INCROPERA et al., 2008).

O controle de malha fechada é um tipo de controle no qual o controlador está conectado ao processo, comparando o ponto fixo á variável controlada, determinando e efetuando a ação corretiva. (STEPHANOPOLULOS, 1984).

O intuito da sintonia de malhas de controle é identificar como a dinâmica de um processo reage aos esforços de controle e, baseados em requisitos de desempenho, determinar a dinâmica necessária para eliminar os erros. Idealmente, busca-se satisfazer os seguintes critérios de desempenho: estabilidade, reduzir o offset (diferença entre o valor real e o desejado), rapidez, robustez e uma ação suave. Cabe salientar que não é possível atender a todos esses critérios, tendo como principal critério a estabilidade. Diante disto, o presente trabalho tem como objetivo selecionar o tipo de controlador que melhor se adequa ao trocador de calor-casco tubo em escoamento paralelo, estimar os valores das constantes de controle e por fim verificar a estabilidade de um trocador de calor casco-tubo e selecionar o tipo de controlador que melhor se adapte ao mesmo.

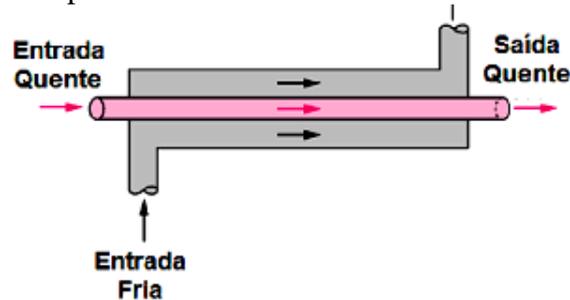


Figura 1- Trocador de calor casco-tubo em escoamento concorrente. Fonte: Incropera (2008).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Tipos de controle

Controle Proporcional (P): Parte proporcional que tem como consequência a geração de offset.

Controle Proporcional Integral (PI): A parte integral desse tipo de controle elimina o offset gerado pela parte proporcional, mas este tipo de controle pode levar o sistema a oscilar.

Controle Proporcional Integral Derivativo (PID): A parte derivativa tem o intuito de amortecer as oscilações geradas pela parte integral do controle. Esse tipo de controle tem como vantagem o fato de alcançar o set point mais rapidamente e o fato de não gerar offset. Por outro lado, a ação derivativa tem a desvantagem de amplificar os sinais de ruído, o que significa que o sistema em estudo não poderia ficar próximo de bombas e turbinas, por exemplo.

2.2 Aplicação dos Métodos de Sintonia e Sintonia Fina

Com o intuito de eliminar ou reduzir o offset, propor uma ação mais suave, uma rapidez maior, aplicou-se uma sintonia nos controladores, para isto, torna-se necessário avaliar o processo de modo a levantar o que se espera alterar, através destes métodos determina-se os coeficientes como k_c , o termo integrativo (τ_i), o termo derivativo (τ_D). Os quatro grupos de métodos quando aplicados corretamente auxiliam nessas alterações de modo a melhorar o processo, são eles:

1. Método de Ziegler – Nichols I;
2. Método de Cohen – Coon;
3. Método de Ultimate Gain;
4. Método de Astrom e Hagglund (auto sintonia).

Após a aplicação da Sintonia torna-se necessário aplicar a Sintonia Fina. Esta última tem o intuito de quantificar o erro e podem ser utilizados os seguintes critérios: ISE (integral do erro ao quadrado), IAE (integral do erro absoluto) e ITAE (integral do erro ponderado pelo tempo) podem ser usados para promover uma melhora dos parâmetros obtidos por outros métodos.

2.3 Análise de estabilidade

Atualmente, existem vários métodos para análise de estabilidade disponíveis na literatura, dessa forma segue abaixo as principais características dos métodos mais aplicados no controle de processos.

- Substituição direta: Não é usado para processos com tempo morto e gera oscilação sustentada já que permite obtenção da constante de controle crítica, K_c crítico, que está no limite da estabilidade;
- Lugar das Raízes: Testa faixas de valores de k_c , é uma técnica mais trabalhosa que a anterior, também não é recomendada para processos com tempo morto, e localiza o K_c crítico;
- Critério da Estabilidade de Routh: Só poderá ser aplicado em polinômios completos com todas as constantes, sendo todas essas maiores que zero, caso não contenha alguma das constantes o processo já é instável, pode ser aplicado aos processos com tempo morto.

3. METODOLOGIA

3.1 Trocador de Calor casco-tubo

A Figura 2 representa o sistema em estudo e a descrição dos elementos presentes no mesmo, que será submetido ao controle em malha fechada.

Considerando por exemplo o trocador de calor casco-tubo da Figura 01. Uma possível variável controlada é a temperatura do fluido quente que escoo pelo casco ($T_{sc}(t)$), uma possível variável manipulada é a vazão de fluido quente que escoo pelo casco ($Q_c(t)$) e os possíveis distúrbios do processo são a vazão de entrada do fluido frio ($Q_t(t)$), a temperatura de entrada do fluido quente ($T_{ec}(t)$) e a temperatura de entrada do fluido frio ($T_{et}(t)$).

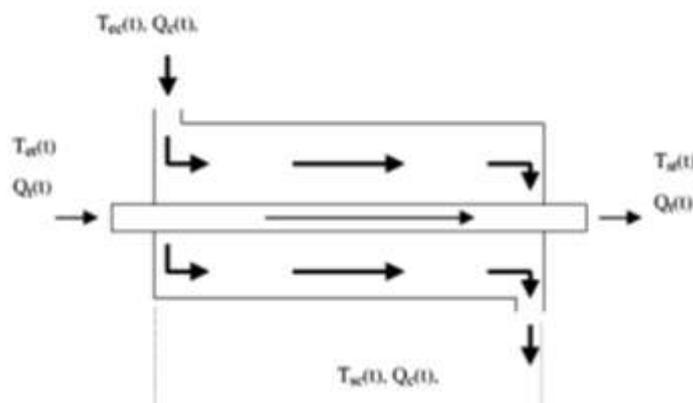


Figura 2- Desenho esquemático de um trocador de calor. Fonte: Cerchiaro (2006).

A denominação casco-tubo se refere ao formato de um tubo cilíndrico na parte externa, designado casco, dentro do qual há um segundo tubo com diâmetro menor, designado tubo.

A seguir, encontram-se as características funcionais do Trocador de Calor adotadas e que influenciaram no desenvolvimento deste trabalho:

- Dois fluidos escoam pelo Trocador de Calor, onde o primeiro deles passa dentro do tubo e o segundo pela região compreendida entre o tubo e o casco, fazendo assim que os dois fluidos não se misturam;
- O calor é transferido de um fluido para outro por condução térmica através do tubo que os separa, onde pelo casco escoam o fluido quente e pelo tubo escoam o fluido que frio;
- Os dois fluidos escoam no mesmo sentido, ou seja, em escoamento concorrente;
- Para a realização deste trabalho considerou-se que as perdas de calor para a vizinhança são desprezíveis.

3.2 Método de Sintonia e Sintonia fina

Dentre os métodos de Sintonia escolheu-se o método de Astrom e Hagglund, para a avaliação da sintonia, já que não se tinha o K_c crítico o método de Ultimate Gain não deverá ser aplicado e os três primeiros também não poderão, devido a necessidade de tempo morto, e nesse caso o processo é de primeira ordem sem tempo morto. Portanto o método de auto sintonia, como não havia restrição torna-se o mais indicado.

A fim de se quantificar o erro, aplicou-se o ITAE, por se tratar de um processo em que se deseja que hajam variações mínimas na temperatura de saída do fluido quente.

3.3 Análises de Estabilidade

Portanto, pode-se aplicar qualquer um dos métodos de análise de estabilidade para trocador de calor em estudo por este se tratar de um processo de primeira ordem sem tempo morto. Dessa forma, escolheu-se o Critério de Estabilidade de Routh por ser uma técnica simples e rápida.

3.4 Comparação dos Controles Aplicados ao Processo

Realizou-se uma comparação do processo, sem controle, com o controle P, PI e PID, a fim de verificar qual se adequou melhor ao processo, esta análise foi realizada plotando-se no mesmo gráfico o sistema em malha aberta (sem controle) e em malha fechada (com controle).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Escolha do Controlador

Para o controle de um trocador de calor casco-tubo em escoamento paralelo, partiu-se de funções de transferência (Equação 1 e Equação 2) que caracterizam sistema em malha aberta. Dessa forma, torna-se necessário fechar a malha para aplicação do controle, sendo que a malha fechada é composta pelo processo a ser controlado, instrumentos de medição, controle e atuação. Nesse último é possível implementar a ação corretiva quando necessário, portanto torna-se necessário identificar novos parâmetros como G_v , G_m , G_c , G_p e G_d , segue abaixo a identificação de cada um deles.

$$G_p = \frac{2,22}{1+34,2s} \quad (1)$$

$$G_d = \frac{-345,43}{1+69s} \cdot e^{-4,2s} \quad (2)$$

- Gp: Função de transferência do Processo. Esta função correlaciona a variável controlada Tsc', com a variável manipulada, Qc'. Esta função foi determinada pela identificação de processos;
- Gd: Função de transferência do Distúrbio. Função que correlaciona a variável controlada, Tsc', com o distúrbio, Qt;
- Gm: Função de transferência do Sensor. Nesta função, estão correlacionadas a variável Tsc', e esta mesma variável na unidade correta de trabalho do controlador;
- Considera-se que Gm=Gv=1;
- Gc: É a função que provém do controle que atuará no trocador de calor.

Desse modo é possível obter a equação característica do trocador em malha fechada (Equação 3) a partir das funções mencionadas acima:

$$y' = \frac{G_p G_c G_v}{1 + G_c G_p G_v G_m} y'_{sp} + \frac{G_d}{1 + G_p G_c G_v G_m} d' \quad (3)$$

$$y' = \frac{\left(\frac{2,22}{1+34,2s}\right) * \left(1 + \frac{1}{11s} + 12s\right)}{1 + \left(\frac{2,22}{1+34,2s}\right) * \left(1 + \frac{1}{11s} + 12s\right)} y'_{sp} + \frac{\frac{-345,43}{1+69s} \cdot e^{-4,2s}}{1 + \left(\frac{2,22}{1+34,2s}\right) * \left(1 + \frac{1}{11s} + 12s\right)} d' \quad (4)$$

Como o intuito é a determinação do melhor controle para o processo em questão, analisaram-se as características e efeitos de cada um dos controles: P, PI e PID, a fim de implantar o que mais se adéqua ao controle da concentração.

O intuito é obter um valor fixo da temperatura do fluido quente (Tsc), sem que haja offset e tendo em vista que o sistema não é sensível a ruídos, ao analisar cada um dos controles e suas particularidades, conclui-se que o melhor tipo de controle para o trocador de calor em estudo é o controle PID, que ao gerar as oscilações, a ação derivativa tende a amortecê-las.

4.2 Determinação dos parâmetros de controle e aplicação dos métodos de Sintonia

Entre os métodos de sintonia, foi escolhido o método de Astrom e Hagglund. O referido método consiste na inserção de um relé, no lugar do controlador, conforme demonstrado pela Figura 3:

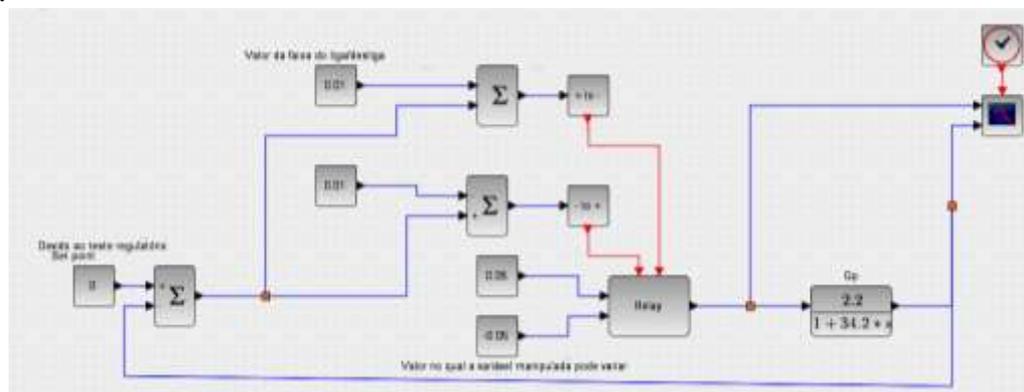


Figura 3. Diagrama de blocos para o método Astrom e Hagglund. Fonte: Próprio autor.

A amplitude deste é ajustada até que o erro apresente oscilações com amplitude e período (T_c) constantes. Onde d é o degrau realizado na variável manipulada e $2a$ é a amplitude da saída do processo.

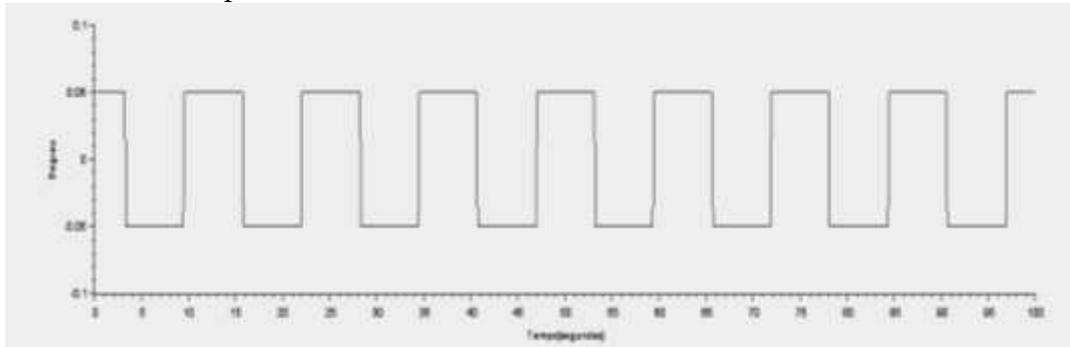


Figura 4. Comportamento do relé na variável manipulada. Fonte: Próprio autor.

Pela observação da figura acima foi determinado que $d = 0,05$.

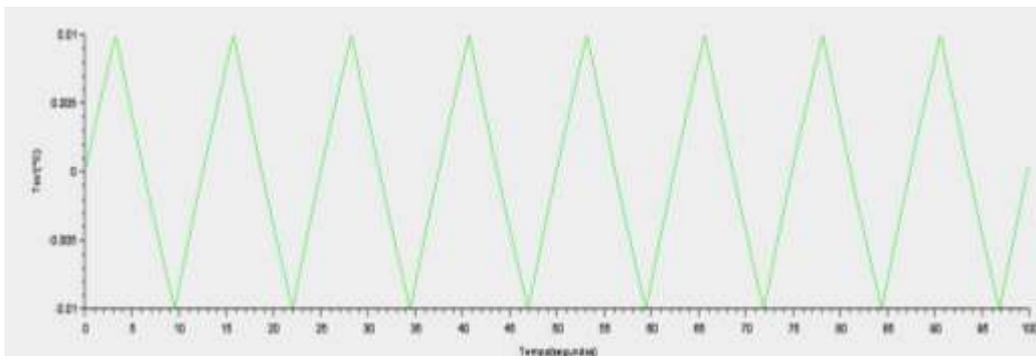


Figura 5. Comportamento do relé na variável controlada. Fonte: Próprio autor.

Pela observação da figura acima foi determinado que $a = 0,01$ e $T_c = 12,30$ segundos.

O K_c crítico pelo método Astrom e Hagglund é determinado pela Equação 5:

$$K_{c_{\text{crítico}}} = \frac{4d}{\pi a} \quad (5)$$

Substituindo os valores encontrados na Equação 5:

$$K_{c_{\text{crítico}}} = \frac{4 \cdot 0,05}{\pi \cdot 0,01}$$

Obtendo-se assim o K_c crítico igual a 6,367. Com os valores de K_c crítico e T_c determinados, por meio da utilização da tabela de Ziegler-Nichols foram determinados os valores ajustados de K_c , K_i e K_D .

Tabela 1 - Tabela de Ziegler – Nichols II, com os valores de K_c , K_i e K_D

	K_c	K_i	K_D
PID	$0,6 \cdot K_{c_{\text{crítico}}}$	$2/T_c$	$T_c/8$

Fonte: Próprio autor.

Substituindo os valores de K_c crítico e T_c , os valores de K_c , K_i , K_D encontrados encontram-se expressos na tabela abaixo:

Tabela 2 - Valores de K_c , K_i e K_D para o controle PID.

	K_c	K_i	K_D
PID	6,367	0,1625	1,538

Fonte: Próprio autor.

Como $K_c = 1,666.k_c$, $K_i = k_c / \tau_i$ e $K_D = k_c \cdot \tau_D$, obtendo-se assim $k_c = 3,82$, $\tau_i = 0,0425$ e $\tau_D = 0,4026$.

4.3 Sintonia Fina

A essência da sintonia de malhas de controle é identificar como a dinâmica de um processo reage aos esforços de controle e determinar a dinâmica necessária para reduzir/eliminar os erros. Dentre os métodos de integração de erro descritos em um dos tópicos anteriores, o método escolhido foi o ITAE devido à necessidade em ter uma variação lenta na variável controlada.

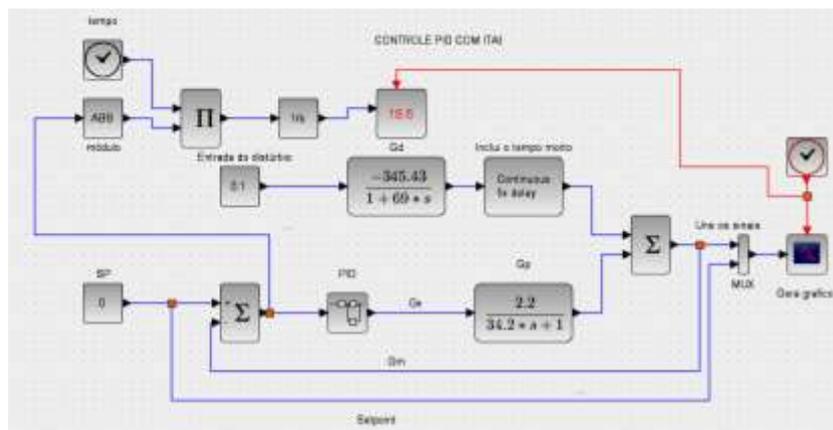


Figura 6. Diagrama de blocos para o ITAE. Fonte: Próprio autor.

Partindo dos valores de k_c , τ_i e τ_D obtidos pelo método Astrom e Hagglund, primeiramente ocorreu a variação de k_c mantendo τ_i e τ_D constantes conforme demonstrado pela tabela abaixo.

Tabela 3 - Variação de K_c , mantendo τ_i e τ_D constantes.

k_c	τ_i	τ_D	ITAE
3,82	0,0425	0,4026	77,6
2	0,0425	0,4026	54
5	0,0425	0,4026	128,5

Fonte: próprio autor.

Logo, dos valores de K_c avaliados o melhor é $k_c = 2$. Com base na mesma analogia descrita acima, variou-se τ_i mantendo-se k_c e τ_D constantes e posteriormente variou-se τ_D

manteve-se k_c e τ_i constantes. Dessa forma, tem-se como os melhores valores de τ_i e de τ_D são , respectivamente , 0,01 e 0,1.

4.3 Análise de Estabilidade

No presente trabalho, utilizou-se o método do Critério de estabilidade de Routh, que é uma verificação da estabilidade do processo de uma forma relativamente rápida por meio da equação característica, que provém do denominador da função de transferência do processo em malha fechada, como segue abaixo:

$$1+G_p.G_v.G_c.G_m=0 \quad (6)$$

Para o trocador de calor em questão a equação característica é a seguinte:

$$1+\left(\frac{2,2}{1+34,2s}\right) \cdot K_c\left(1+\frac{1}{\tau_i s}+\tau_D s\right)=0 \quad (7)$$

Após efetuar as multiplicações obteve-se a equação abaixo:

$$\underbrace{2,2k_c}_{a_0} + \underbrace{(\tau_i+2,2K_c*\tau_i)}_{a_1} s + \underbrace{(34,2\tau_i+2,2\tau_i\tau_D*k_c)}_{a_2} s^2=0 \quad (8)$$

Sabe-se que para aplicação deste método, existem dois critérios que devem ser obedecidos:

- Na equação característica (Equação 8) não deverá haver nenhum coeficiente negativo ou zero, caso haja o processo já é instável;
- A partir da construção da matriz de Routh se todos os valores da primeira coluna da matriz forem positivos, o processo é estável.

Logo, com os coeficientes da equação característica foi possível montar a matriz de Routh, como segue abaixo:

Tabela 6 - Aplicação da Matriz de Routh no processo.

1	$34,2\tau_i+2,2\tau_i\tau_D*k_c$	$2,2k_c$
2	$\tau_i+2,2K_c*\tau_i$	0
3	$\left[\begin{array}{cc} 34,2\tau_i+2,2\tau_i\tau_D*k_c & 2,2k_c \\ \tau_i+2,2K_c*\tau_i & 0 \end{array} \right]$	0
	$-(\tau_i+2,2K_c*\tau_i)$	

Fonte: Próprio autor.

Ao resolver a matriz de Routh, obteve-se a seguinte equação:

$$\frac{34,2\tau_i+2,2\tau_i\tau_D*k_c \quad 2,2k_c}{\tau_i+2,2K_c*\tau_i \quad 0} > 0 \quad (9)$$

Logo: $(2,2.k_c)>0$, $k_c>0$. Assim pode-se afirmar que o processo é estável para todos os valores de $k_c >0$.

Como comprovação da estabilidade do processo, torna-se necessário substituir os valores de k_c , τ_i e τ_D na matriz, para confirmar que cada coeficiente é maior que zero.

Por fim com os valores de: $k_c = 2$, $\tau_i = 0,01$ e $\tau_D = 0,1$, calculou-se cada um dos coeficientes.

- $2,2 \cdot k_c > 0$, ou seja, $4,4 > 0$
- $\tau_i + 2,2 \cdot k_c \cdot \tau_i > 0$, ou seja, $0,054 > 0$
- $34,2 \cdot \tau_i + 2,2 \cdot \tau_i \cdot \tau_D \cdot k_c > 0$, ou seja, $0,3464 > 0$

Portanto pode-se concluir que cada coeficiente atendeu ao critério de Routh, dessa forma o processo é estável.

4.3 Comparação dos Controles no Processo

Após a definição dos valores de k_c , τ_i e τ_D , simulou-se os três tipos de controle para avaliar o mais viável para um trocador de calor casco-tubo.

Após a simulação obteve-se o seguinte resultado apresentado na Fig. 7 e na Fig. 8.

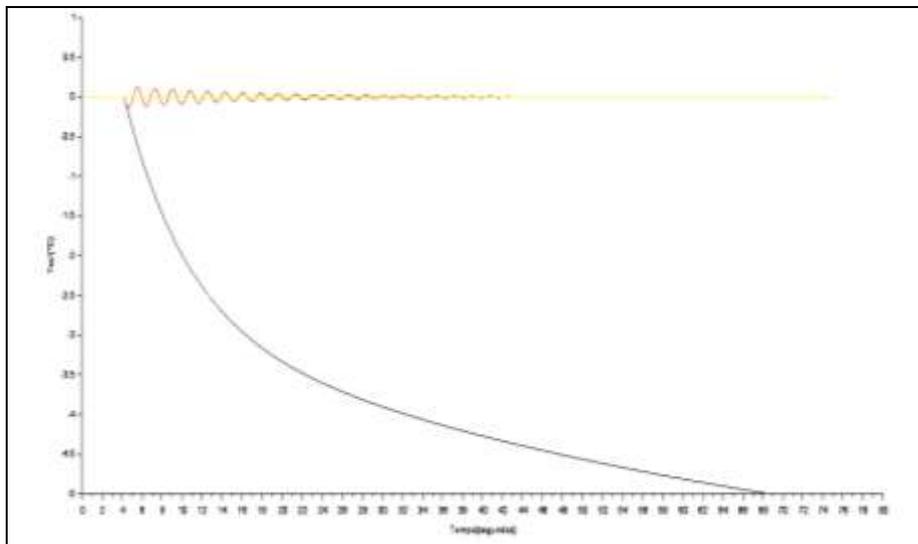


Figura 7- Análise dos tipos de controles P (linha preta), PI (linha verde) e PID (linha vermelha) possivelmente aplicáveis em um trocador de calor casco tubo em relação ao set poin (linha amarela). Fonte: Próprio autor.

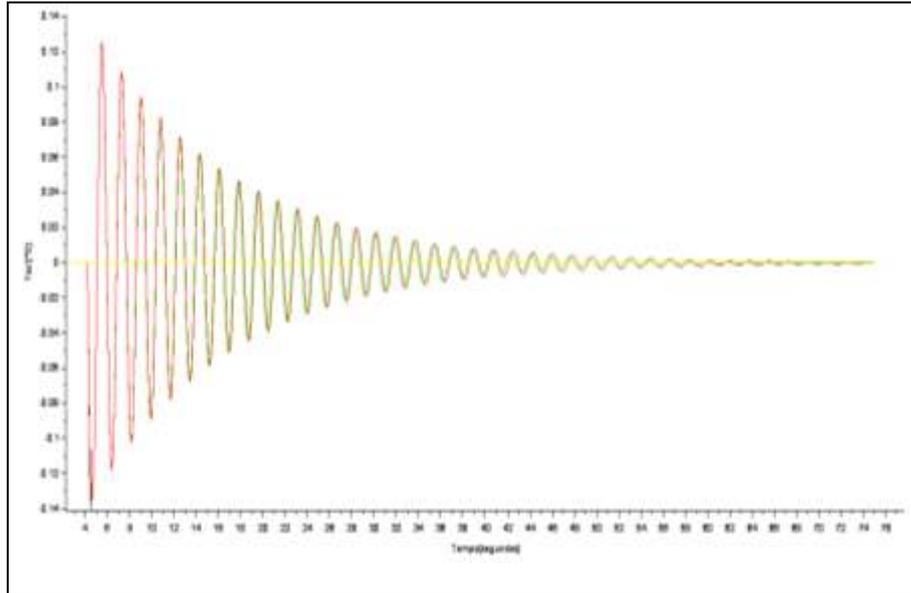


Figura 8- Gráfico ampliado da resposta a aplicação dos controles PI e PDI. Fonte: Próprio autor.

Com base nos resultados gráficos apresentados na Fig. 8 têm-se que para o trocador em estudo e considerando os valores dos parâmetros de controle utilizados, pode ser aplicado tanto o controle PI como o PID, o que pode ser explicado pelo valor de τ_D encontrado ter sido tão baixo.

5. CONCLUSÃO

Dado o exposto acima, têm-se que após a determinação das funções transferência, do processo e do distúrbio, de um sistema de um trocador de calor casco-tubo com escoamento concorrente foi proposto a análise e a determinação do melhor controle para o sistema. Os parâmetros de controle, k_c , τ_i e τ_D , calculados através da sintonia fina, fizeram com que a resposta ao controle não oscilasse. Com isso, tanto o controle PI como o PID podem ser implementados no sistema.

REFERÊNCIAS

- Cerchiaro, Denis Fava. Controle de temperatura de um trocador de calor. Disponível em: <[www.teses.usp.br/teses/...](http://www.teses.usp.br/teses/)>
- Incropera, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. Fundamentos de transferência de calor e massa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.
- Stephanopoulos, George. Chemical process control: An introduction to theory and practice. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1984.
- Cerchiaro, Denis Fava. Controle de temperatura de um trocador de calor. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/...>

APPENDIX A

CONTROL AND DYNAMICS OF A CASCO-TUBE HEAT EXCHANGER THROUGH CLOSED CASE ANALYSIS

Abstract. *The automatic control applied in processes maintains the variables like temperature, pressure, flow, among others, in a certain desired operational value. Since changes are always present in the processes and if no correction is applied in response, the quality of the product, the production rate among other parameters will not reach the desired conditions, thus affecting the safety and the efficiency of the process. Therefore, the present work aims to select the type of controller that best fits the heat exchanger-tube hull in parallel flow, estimate the values of the control constants and finally verify the stability of a hull-tube heat exchanger and select the type of controller that best suits it.*

Keywords: *Control, Closed Loop, Simulation, Heat Exchanger.*