

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

SISTEMA DE CONTROLE AVANÇADO APLICADO A UM TROCADOR DE CALOR CASCO-TUBOS

AUTORES:

SILVA, M. P.; LIMA, A. M. N.; ROCHA NETO, J. S.

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

SISTEMA DE CONTROLE AVANÇADO APLICADO A UM TROCADOR DE CALOR CASCO-TUBOS

Abstract

In this work we present activities related to modeling and simulation applied to a shell and tubes heat exchanger using an advanced control architecture based on networked predictive control. From the strategy of networked predictive control were evaluated the impacts of communication delays that exist in the communication path between the controller and plant and also the sensor and the controller. In the simulation phase the loop was closed by using a network model simulated with the *TrueTime*[®] software package, so all shared network restrictions related to delays and packet loss could be studies. The results shows changes in the system dynamics when delays where considered inserted by communication network.

Introdução

Em sistemas de controle industriais, a utilização de arquiteturas de redes de comunicação baseadas em barramento, podem trazer um série de vantagens, entre elas melhorar a eficiência, a flexibilidade, e a confiabilidade do sistema como um todo, reduzindo o tempo e os custos de instalação, reconfiguração e manutenção. Os sistemas de controle que utilizam uma rede de comunicação compartilhada são chamados de Sistemas de Controle em Rede ou *Networked Control Systems* (NCS).

Nos sistemas de controle tradicionais em que a arquitetura de comunicação é do tipo barramento, ou seja, todos os recursos de um enlace de comunicação estão dedicados exclusivamente aos equipamentos interconectados a ele, podemos assim abstrair o meio de comunicação para o sistema de controle. Já em uma arquitetura com topologia em árvore, os recursos são compartilhados com os diversos equipamentos, introduzindo atrasos de comunicação, variação dos atrasos (Jitter) e também perdas de pacotes. Portanto não podemos fazer a mesma consideração que no caso anterior, pois os efeitos mencionados degradam o desempenho de um sistema de controle, podendo inclusive levar o mesmo a uma condição operacional de instabilidade. A utilização de técnicas de controle avançado e otimização da produção em tempo real trazem os seguintes benefícios: Redução das perdas de produção; Uso eficiente dos recursos energéticos (gás, energia elétrica, etc); Aumento da estabilidade e confiabilidade operacional; Redução do tempo de partida e parada dos poços e da planta, bem como dos transientes gerados; e Aumento da vida útil dos equipamentos. A utilização destes sistemas em plantas petroquímicas de processamento, já acontece desde os anos 90 proporcionando ganhos econômicos consideráveis (aumento na recuperação líquido de gás natural em até 31%), além do aumento da eficiência energética e redução da utilização dos queimadores de gás (Campos e Texeira, 2010).

O sistema de controle preditivo em rede consiste de duas partes principais: o **Gerador de Predições de Controle** (GPC) e o **Compensador de Atrasos** (CA). A função do GPC é calcular uma seqüência de sinais futuros de controle que devem ser enviados à planta, enquanto a função do CA é selecionar o sinal de controle $u(t)$ a partir da seqüência de controle e do atraso τ . Na Figura 3.a ilustra-se a arquitetura do sistema de controle preditivo em rede. A rede de comunicação é representada no ambiente de simulação *TrueTime*[®].

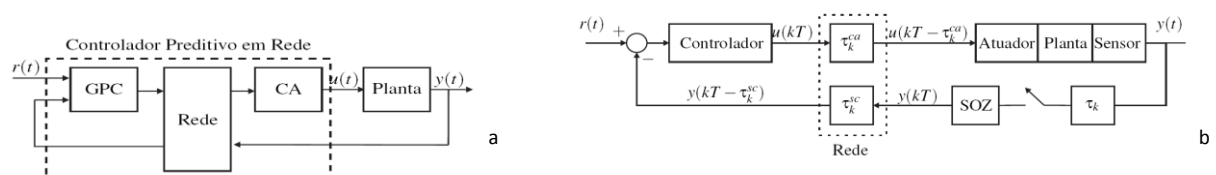


Figura 3: Sistema de controle preditivo em rede (a) e estrutura típica de um sistema de controle em rede (b)

A partir da Figura 3.b, representa-se os atrasos de comunicação τ_k^{ca} e τ_k^{sc} entre o controlador-atuador e sensor-controlador, respectivamente.

Neste artigo avalia-se a utilização da estratégia de controle preditivo em rede como forma de mitigação dos efeitos dos atrasos de comunicação, utilizando um modelo de um trocador de calor casco-tubos como representação de um processo físico real.

Metodologia

O ambiente de simulação referente à rede comunicação é baseado no *TrueTime*®, de forma que a influencia da técnica de controle de acesso ao meio de comunicação em redes com e sem fio, afetam o desempenho dos sistemas de controle ligados a estas redes. A partir do *TrueTime*®, é possível selecionar características da rede comunicação que são importantes e causam impactos em relação aos atrasos de comunicação.

Um esquema útil para compreensão do processo de cálculo da estrutura de controle avançado utilizando o controle preditivo em rede é utilizar os passos listados abaixo:

1. Projetar um controlador para o sistema sem atrasos de transmissão, satisfazendo os requisitos e usando métodos de controle convencional, por exemplo, PID, LQG, MPC, etc; Esta estratégia de calculo é baseada em evento;
2. Calcular a sequência de sinais de controle do GPC a partir da técnica selecionada na etapa anterior;
3. Transmitir a sequência de sinais de controle para o CA através da rede simulada pelo *TrueTime*® utilizando a técnica de acesso CSMA/CA;
4. Utilizar o compensador de atrasos para selecionar o sinal de controle que deverá ser aplicado à planta a partir de um taxa de amostragem selecionada.

Desta forma, as próximas etapas apresentam um arcabouço matemático necessário para cálculo do GPC e do CA.

a) Projeto do Gerador de Predições de Controle

Inicialmente as seguintes condições simplificadoras devem ser consideradas:

- a. O atraso no canal de comunicação que liga o GPC ao CA é aleatório e dado por τ_{ca} , porém limitado por $\overline{\tau_{ca}}$;
- b. O atraso no canal de comunicação que liga a planta ao GPC é constante e é dado por τ_{sc} ;
- c. O número de pacotes consecutivos perdidos entre o GPC e CA não é maior que N_c ;
- d. Os dados transmitidos através da rede possuem uma marcação do instante de tempo em que foram transmitidos;

Considera-se que $\mathfrak{R}[z^{-1}, p]$ representa um conjunto de polinômios em z^{-1} com coeficientes reais e de ordem $p \geq 0$. Considerando um sistema SISO (*Single-Input Single-Output*), representado pela equação 1 e discreto no tempo, em que $y(t+d)$, $u(t)$ e d representam a saída, a entrada e o tempo de atraso da planta respectivamente.

$$A(z^{-1})y(t+d) = B(z^{-1})u(t) \quad (1)$$

Os polinômios $A(z^{-1}) \in \mathfrak{R}[z^{-1}, n]$ e $B(z^{-1}) \in \mathfrak{R}[z^{-1}, m]$, representam os polinômios do sistema. Para realização do projeto do GPC, não é considerado a existência de atrasos, portanto o mesmo é dado por:

$$C(z^{-1})u(t) = D(z^{-1})e(t+d)$$

(2)

Para compensar o atraso de transmissão da rede, a sequência de controle $u(t+i | t)$ calculada no instante t , para $i = 1, 2, \dots$, é gerada por:

$$C(z^{-1})u(t+i | t) = D(z^{-1})e(t+d+i | t) \quad (3)$$

E o erro de predição $e(t+d+i | t)$ no instante t é definido por:

Onde $y(t+d+i | t)$ é $e(t+d+i | t) = r(t+d+i) - \hat{y}(t+d+i | t)$ a predição da saída no instante t e $r(t+d+i)$ é a entrada de referência futura. Dado que o tempo de atraso de comunicação entre o sensor e o controlador é dado por τ_{sc} , uma predição da saída da planta no instante $t - \tau_{sc} + d + i$, pode ser realizada utilizando a equação de Diophantus para $i = 1, 2, \dots, N$. Considere a equação de Diophantus:

$$A(z^{-1})E_i(z^{-1}) + z^{-i}F_i(z^{-1}) = 1 \quad (5)$$

Onde: $E_i(z^{-1}) \in \mathcal{R}[z^{-1}, i-1]$ e $F_i(z^{-1}) \in \mathcal{R}[z^{-1}, N-1]$ são polinômios.

Da consideração simplificadora feita no item b anteriormente, fica claro que as saídas passadas até o tempo $t - \tau_{sc}$ estão disponíveis para o gerador de predições de controle. Portanto combinando a equação 5 e 1 e após algumas manipulações matriciais, obtém-se o seguinte conjunto de sinais de controle a partir do instante t (Wang and Liu, 2008).

$$\begin{bmatrix} u(t - \tau_{sc} | t) \\ u(t - \tau_{sc} + 1 | t) \\ \vdots \\ u(t - \tau_{sc} + N - 1 | t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0(z^{-1}) \\ P_1(z^{-1}) \\ \vdots \\ P_{N-1}(z^{-1}) \end{bmatrix} r(t - \tau_{sc} + d + N - 1) + \begin{bmatrix} Q_0(z^{-1}) \\ Q_1(z^{-1}) \\ \vdots \\ Q_{N-1}(z^{-1}) \end{bmatrix} y(t - \tau_{sc}) - \begin{bmatrix} S_0(z^{-1}) \\ S_1(z^{-1}) \\ \vdots \\ S_{N-1}(z^{-1}) \end{bmatrix} u(t - \tau_{sc} - 1) \quad (6)$$

Onde:

$$\begin{aligned} [P_0(z^{-1})P_1(z^{-1}) \dots P_{\tau_{sc}}(z^{-1}) \dots P_{N-1}(z^{-1})]^T &= \\ (L + M)^{-1} [z^{-N+1}z^{-N+2} \dots z^{-N+\tau_{sc}} \dots z^{-1}1]^T D(z^{-1}) \\ [Q_0(z^{-1})Q_1(z^{-1}) \dots Q_{\tau_{sc}}(z^{-1}) \dots Q_{N-1}(z^{-1})]^T &= (L + M)^{-1} F(z^{-1})D(z^{-1}) \\ [S_0(z^{-1})S_1(z^{-1}) \dots S_{\tau_{sc}}(z^{-1}) \dots S_{N-1}(z^{-1})]^T &= (L + M)^{-1} (\Gamma(z^{-1}) + H(z^{-1})) \end{aligned}$$

O polinômio $P_i(z^{-1}) \in \mathcal{R}[z^{-1}, N-1]$, $Q_i(z^{-1}) \in \mathcal{R}[z^{-1}, N-1]$, e $S_i(z^{-1}) \in \mathcal{R}[z^{-1}, \max(n_c - i - 1, n_d + m + \tau_{sc} + d - 2, 0)]$. Então a sequência de controle entre $t - \tau_{sc}$ e $t - \tau_{sc} + N - 1$ será gerada a partir da equação 6 (Hu et al., 2006).

b) Projeto do Compensador de Atrasos da Rede

Uma característica muito importante de uma rede de comunicação é que os dados disponíveis para transmissão podem ser colocados em pacotes e enviados em um determinado instante de tempo t . Desta forma, assume-se que todas as predições de controle calculadas no instante t são encapsuladas e enviadas para a planta através da rede (Wang and Liu, 2008). A função do compensador de atrasos é escolher o valor da variável de controle $u(t)$, baseado no tempo de atraso τ dado a partir do RTT (Hu et al., 2006). O CA é baseado em tempo, ou seja, a cada instante de tempo, deve ser gerado um sinal de controle não importando se uma nova sequência de controle foi recebida. O algoritmo de funcionamento do CA considera dois cenários:

i) Pacotes recebidos com seqüências de controle durante o ciclo de controle: Esta parte do algoritmo pode ser subdividida em:

Parte 1: Seleção dos pacotes recebidos: Se o número de pacotes recebidos é maior do que um, será selecionado aquele que possuir a marcação de tempo mais atual.

Parte 2: Medição do atraso a partir do RTT: O tempo de atraso é facilmente medido a partir da marcação de tempo t_s inserida no pacote que contém a seqüência de controle, portanto:

$$\tau = t - t_s \quad (7)$$

Em que t é o instante atual no lado da planta e τ representa o somatório dos tempos τ_{ca} e τ_{sc} .

Parte 3: Seleção do sinal de controle: O sinal de controle u a ser aplicado na planta é escolhido com base no tempo de atraso τ . Então o sinal de controle selecionado na seqüência 6 é dado por:

$$u(t) = u(t \mid t - \tau_{ca}) = u(t - \tau_{ca} - \tau_{sc} + \tau \mid t - \tau_{ca}) \quad (8)$$

O sinal de controle selecionado a partir da seqüência 9 é o τ -ésimo sinal de controle sem considerar os tempos τ_{ca} e τ_{sc} individualmente.

$$\begin{bmatrix} u(t - \tau_{ca} - \tau_{sc} \mid t - \tau_{ca}) \\ u(t - \tau_{ca} - \tau_{sc} + 1 \mid t - \tau_{ca}) \\ \vdots \\ u(t - \tau_{ca} - \tau_{sc} + N - 1 \mid t - \tau_{ca}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

ii) Pacotes não são recebidos com seqüência de controle durante o ciclo de controle: Este caso considera a situação em que outro pacote com uma nova seqüência de controle não é recebido. Desta forma o sinal de controle $u(t)$ selecionado é o do instante $\tau + 1$, dado por:

$$u(t) = u(t \mid t - \tau_{ca} - 1) = u(t - \tau_{ca} - \tau_{sc} + \tau + 1 \mid t - \tau_{ca} - 1) \quad (10)$$

Após cada instante de tempo em que o sinal de controle u é selecionado, o mesmo deve ser armazenado juntamente com o sinal de saída y da planta. O tamanho do *buffer* utilizado é determinado pelo modelo da planta e também pela técnica de controle utilizada (Hu et al., 2006). Neste caso as seqüências armazenadas são:

$$\begin{bmatrix} y(t) \\ y(t-1) \\ \vdots \\ y(t-n_c) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} u(t-1) \\ u(t-2) \\ \vdots \\ u(t-n_c) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Em que n_c é o horizonte de controle. Estas seqüências são armazenadas a cada instante t e enviadas para o GPC.

c. Trocadores de Calor Casco-Tubos

Uma configuração comumente utilizada em instalações industriais petroquímicas é o trocador de calor Casco-Tubos, ilustrado na Figura 5. Esse trocador tem um casco com múltiplos tubos, cujo escoamento se dá em um único passe através do casco. Chicanas ou defletores são freqüentemente instalados para aumentar o coeficiente de convecção do lado do casco pela indução de turbulência e por uma componente de velocidade de corrente cruzada (Moran, 2005).

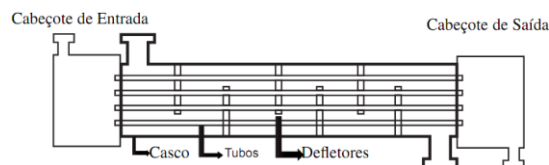


Figura 5: Estrutura mecânica de um trocador de calor Casco-Tubos

A quantidade total de calor transferida em um trocador calor Casco-Tubos poder ser calculada por:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ML} \quad (12)$$

- U.A representa o coeficiente global de transferência de calor e é função das resistências térmicas e da área externa de transferência de calor dos tubos.
- ΔT_{ML} é a diferença logarítmica média de temperatura calculada a partir das diferenças de temperatura da corrente quente e fria de líquido.

Considerando o modelo de um trocador de calor casco-tubos apresentado por Garcia (2009), em que os subscritos CS,CE, TS, TE, T e C significam que as variáveis estão associadas à saída e entrada do casco e tubo, e apenas ao tubo e ao casco respectivamente. Portanto considerando as variáveis envolvidas no processo de modelagem e as mesmas representam as seguintes grandezas físicas: T-Temperatura, v-Vazão, V- Volume, ρ -Densidade, c_A -calor específico da água, Δ -operado diferença.

Desta forma o modelo do trocador de calor representado em espaço de estados pela equação 13 será utilizado para o projeto do GPC.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} \quad (13) \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u} \end{aligned} \quad \mathbf{x} = [\hat{T}_{TS} \quad \hat{T}_{CS}] \quad \mathbf{u} = [\hat{v}_{CE} \quad \hat{v}_{TE} \quad \hat{T}_{CE} \quad \hat{T}_{TE}] \quad \mathbf{y} = [\hat{T}_{TS}]$$

Onde as matrizes A e B são dadas por:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-\rho_{TE} \cdot c_A \cdot \hat{v}_{TE} - U \cdot A \cdot \frac{\partial \Delta T_{CT}}{\partial T_{CE}}}{\rho_T \cdot V_T \cdot c_A} & \frac{U \cdot A \cdot \frac{\partial \Delta T_{CT}}{\partial T_{CS}}}{\rho_T \cdot V_T \cdot c_A} \\ \frac{U \cdot A \cdot \frac{\partial \Delta T_{CT}}{\partial T_{CE}}}{\rho_C \cdot V_C \cdot c_A} & \frac{-\rho_{CE} \cdot c_A \cdot \bar{v}_{CE} - U \cdot A \cdot \frac{\partial \Delta T_{CT}}{\partial T_{CS}}}{\rho_C \cdot V_C \cdot c_A} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & 0 & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}$$

$$b_{12} = \frac{\rho_{TE} \cdot (\bar{T}_{TE} - \bar{T}_{TS})}{\rho_T \cdot V_T} \quad b_{13} = \frac{U \cdot A \cdot \frac{\partial \Delta T_{CT}}{\partial T_{CE}}}{\rho_T \cdot V_T \cdot c_A}$$

$$b_{14} = \frac{\rho_{TE} \cdot c_A \cdot \bar{v}_{TE} - U \cdot A \cdot \frac{\partial \Delta T_{CT}}{\partial T_{CS}}}{\rho_T \cdot V_T \cdot c_A} \quad b_{21} = \frac{\rho_{CE} \cdot (\bar{T}_{CE} - \bar{T}_{CS})}{\rho_C \cdot V_C}$$

$$b_{23} = \frac{\rho_{CE} \cdot c_A \cdot \bar{v}_{CE} - U \cdot A \cdot \frac{\partial \Delta T_{CT}}{\partial T_{CE}}}{\rho_C \cdot V_C \cdot c_A} \quad b_{24} = \frac{U \cdot A \cdot \frac{\partial \Delta T_{CT}}{\partial T_{CS}}}{\rho_C \cdot V_C \cdot c_A}$$

Para a obtenção das matrizes do sistema com valores numéricos, deve-se simular o modelo em regime estacionário, usando os seguintes valores para as variáveis manipuláveis a partir das condições nominais de operação:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{TS}(0) &= 40,0 \text{ } ^\circ C & \bar{T}_{CS}(0) &= 74,398 \text{ } ^\circ C \\ \bar{v}_{CE} &= 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} & \bar{v}_{TE} &= 6,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \\ \bar{T}_{CE} &= 90 \text{ } ^\circ C & \bar{T}_{TE} &= 28 \text{ } ^\circ C \end{aligned}$$

d. Simulação do Controle Avançado do Trocador de Calor Casco-Tubos

O modelo do trocador de calor juntamente com um controlador preditivo, interligados através do TrueTime®, compõem uma estrutura de simulação para análise deste sistema operando sob as condições de um sistema de controle em rede.

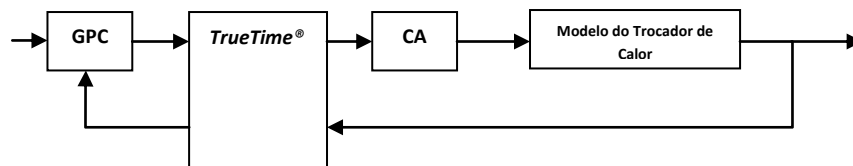


Figura 6: Diagrama de blocos da estrutura de simulação utilizada

O *TrueTime*® é utilizado para representar o cenário de uma rede comunicação compartilhada em relação às contenções inseridas, no que diz respeito aos atrasos e perda de pacotes. No cenário de simulação proposto, estas contenções são obtidas a partir de um conjunto de nós de comunicação que demandam acesso ao meio de comunicação e assim, a partir de sua técnica de acesso ao meio é determinado tempos aleatórios que de forma acumulativa deveram representam tempos de atrasos em relação ao envio e recebimento de informação armazenados em seus *buffers* de comunicação.

Resultados e Discussões

Do ponto de vista da simulação realizada, realizou-se a simulação do modelo não-linear e linear do trocador de calor casco-tubos. Os resultados obtidos apresentam respostas dinâmicas semelhantes, com um erro de 0,1% no estado estacionário. Representa-se na Figura 7 os resultados da simulação do modelo linear e não-linear do trocador de calor casco-tubos.

Para fins de cálculo do controlador preditivo, será considerado um horizonte de predição igual a 10 e um horizonte de controle igual a 8 instantes de amostragem. Considerando que os atrasos de comunicação são iguais a zero, representa-se na Figura x a resposta do sistema de controle em malha fechada e em malha aberta, considerando os horizontes de predição e controle utilizados anteriormente. É possível observar como a ação do controlador garante uma variação menor que 0,08% em relação ao valor nominal de 40°C.

Para avaliarmos o comportamento do sistema de controle em malha fechada com atrasos, considera-se um atraso de comunicação de ordem 2 nas malhas controlador-atuador e sensor-controlador, de tal forma que a resposta do sistema será avaliada considerando os atrasos de forma separada em cada malha. Na Figura 9 observar-se que o efeito do atraso na malha controlador-atuador, provocou um sobresinal na variável controlada, ou seja, como o estado da planta evolui constantemente para um determinado sinal de controle e como não havia uma nova sequência de sinais de controle, a variável controlada evoluiu para uma condição além daquela representada pela resposta do sistema sem atrasos. O efeito do atraso na malha sensor-controlador apresentou como resultado um *overshot* menor que no caso anterior, porém constata-se na Figura 10 uma oscilação amortecida após 40 segundos. Caso o atraso de comunicação nesta malha aumente além dos limites dos horizontes de controle e predição estabelecidos, o sistema de controle preditivo em rede entra em estado de oscilação não amortecida, sendo esta condição representada na Figura 11. Como o valor de N é 10 e N_c é igual a 8, implica que o somatório dos tempos τ_{SC} e τ_{CA} não pode ser maior que 2. A condição de simulação representada na Figura 11 considera $\tau_{SC} + \tau_{CA} = 3$. Desta forma, os efeitos dos atrasos citados não poderão ser minimizados, e assim o sistema com controle preditivo em rede deverá apresentar uma resposta que contém ao menos uma oscilação não amortecida juntamente com um *overshot*.

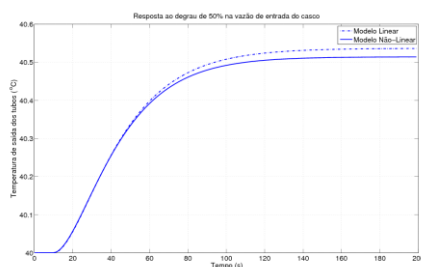


Figura 7: Resposta dos modelos do trocador de calor casco-tubos.

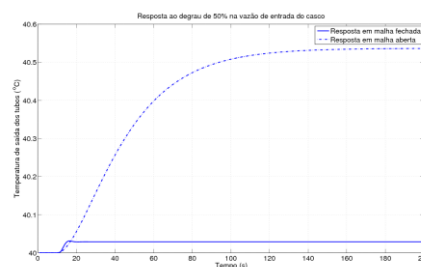


Figura 8: Resposta do sistema em malha aberta e em malha fechada (Sem atrasos).

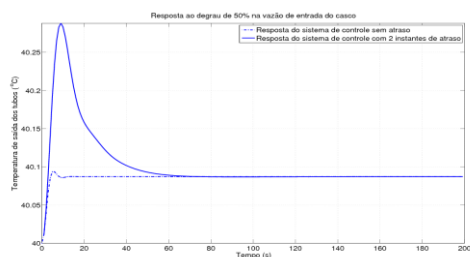


Figura 9: Resposta do sistema de controle preditivo com atraso na malha controlador-atuador.

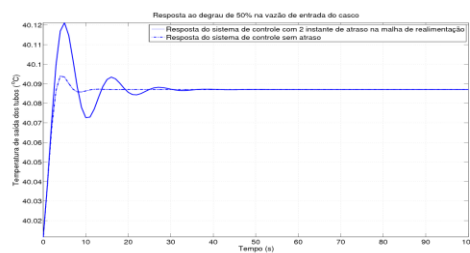


Figura 10: Resposta do sistema de controle preditivo com atraso na malha sensor-controlador.

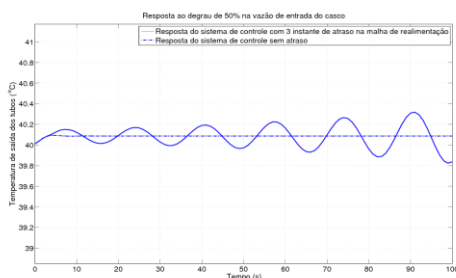


Figura 11: Resposta do sistema de controle preditivo com atraso na malha sensor-controlador.

Conclusões

Em relação às simulações realizadas, verificou-se que os atrasos de fato provocaram alterações (sobre-saltos e oscilações) significativas no comportamento da planta. Estas alterações são explicadas pelo fato de que a variável de saída do modelo evolui constantemente para um determinado sinal de controle aplicado à planta, mas em decorrência do atraso de comunicação, novos sinais de controle não chegavam para a planta, mantendo a variável de controle em um valor não proporcional ao estado da planta. Como há atrasos na malha de realimentação, os estados da planta que eram atualizados para o controlador não refletiam o valor atual, gerando assim um erro de cálculo para o sinal de controle. A partir das constatações citadas e dos resultados apresentados, outros resultados obtidos do ambiente de simulação serão incluídos na versão final deste trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP pelo apoio dado ao programa de formação de recursos humanos PRH-42 para realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Campos, M e Texeira, Alex F., "Novos Paradigmas de Automação, Controle Avançado e Otimização em Tempo Real para Unidades de Produção Marítima de Produção", Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2010
- Garcia, C. "Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos", Edusp, 2009.
- Moran, M. J. Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor, LTC, Rio de Janeiro, 2005.
- Wang, F.-Y. and Liu, D. Networked Control Systems Theory and Applications, Springer, 2008.