

**DINCON 2017**CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES
30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

Comparação Entre Métodos De Controle PID e Preditivo DMC MISO No Controle Da Temperatura De Um Trocador De Calor

Marcio Vescovi Saccani¹, Gustavo Maia de Almeida²

Resumo. Este artigo apresenta a modelagem, a simulação e as características de um controle preditivo DMC MISO restrito, comparado ao controle PID convencional aplicado em um aquecedor de água em uma planta de produção de Salmoura. O controle da temperatura da água aquecida é de fundamental importância para a qualidade da salmoura produzida no referido processo, e a aplicação das técnicas de restrição e de previsão de controle são abordadas neste trabalho como proposta para minimizar o *overshooting* quando ocorrem variações abruptas da vazão de água para o aquecedor.

Palavras-chave. Controle preditivo por Matriz Dinâmica DMC, Controlador PID, trocador de calor.

Abstract. This paper presents the modeling, simulation and characteristics of a restricted MISO DMC predictive control, compared to the conventional PID control applied in a water heater in a Brine production plant. The temperature control of the heated water has fundamental importance for the quality of the brine produced in the related process, and the application of the restriction techniques and control prediction are described in this article as a proposal to minimize the overshooting when the water flow rate to the heater is abruptly changed.

Key words. Dynamic Matrix Control DMC, Controller PID, heater.

1 Introdução

A utilização de estratégias de controle diferenciadas tem sido cada vez mais uma necessidade nas indústrias em geral, com o objetivo de atender a evolução do mercado e manter um elevado grau de competitividade e rentabilidade. Porém, estratégias de controle avançado, que permitam alcançar um alto grau de eficácia e competitividade na operação dos processos não vêm sendo empregadas de forma extensiva, continuando-se a utilizar estratégias de controle convencionais. Além disso, é comum o tratamento de processos multivariáveis como se fossem monovariáveis, dividindo um sistema de múltiplas entradas e saídas em subsistemas de uma entrada e uma saída [5].

Em processos de troca térmica, a necessidade de se obter uma resposta rápida da variável controlada está relacionada a qualidade do produto e também a segurança do processo. No entanto, processos como este, que possuem elevado tempo morto, são difíceis de controlar através de

¹ marcio.saccani@gmail.com

² gmaia@ifes.edu.br

técnicas tradicionais [6], pois o atraso na resposta de controle introduz na malha um decremento de fase, sendo necessária a diminuição do ganho proporcional para alcançar a estabilidade, vindo com isso a lentidão no controle.

A unidade de aquecimento de água deste artigo está localizada em uma planta de produção de salmoura, que consiste na dissolução do Cloreto de Sódio em água, previamente aquecida em um trocador de calor do tipo casco tubo com dois passes do lado da água (Figura 1), em que a temperatura de saída é controlada pela injeção de vapor através do controlador PID 1 e a vazão de água que passa pelo trocador é controlada pelo controlador PID 2. A solução de salmoura produzida, com concentração e temperatura controladas, é utilizada como matéria prima em processos eletrolíticos, como para produção do Cloro-Soda, Clorato de Sódio, entre outros.

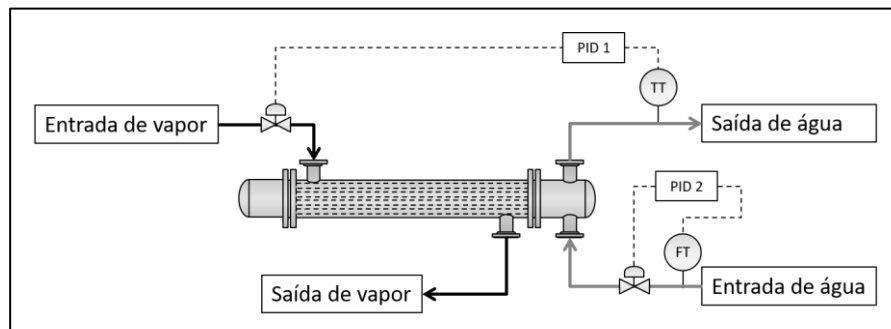


Figura 1: Trocador de calor tipo casco tubo de aquecimento de água com a representação simplificada das malhas de controle de temperatura e de vazão de água.

No problema estudado é analisada a elevação ou diminuição excessiva da temperatura quando ocorre variação abrupta da vazão volumétrica de água que é introduzida no trocador de calor, fazendo com que a temperatura muitas vezes alcance valores até 50 % acima ou abaixo do *set-point* de trabalho. Essas oscilações abruptas de temperatura são prejudiciais ao processo, bem como aos equipamentos que têm contato com o fluido aquecido.

Na Figura 2 há uma representação gráfica do problema – é apresentado o extrato de um experimento realizado no processo, no qual a vazão de água para o trocador (“PV de Vazão de Água”) foi alterada repetidamente de forma a causar um distúrbio em malha fechada no controle de temperatura (PID tradicional sintonizado) com a malha em modo fechado em regime regulatório de controle com *set-point* fixo em 75,0 °C durante todo o experimento. Como se pode observar, o controle de temperatura estabiliza relativamente rápido e mantém-se com erro mínimo em relação ao *set-point* enquanto o controle de vazão de água para o trocador mantém-se estável, mas ocorre overshooting de até 50 % quando a vazão de água é reduzida ou aumentada em mais de 20 %.

Essa característica observada no experimento é comumente observada em muitos aquecedores de líquidos à vapor, em virtude da dinâmica da resposta de temperatura ser naturalmente lenta em relação à dinâmica do controle de vazão [4]. Uma saída comum utilizada nesses casos é incluir restrições ao controlador que evitem a variação brusca de vazão (como por exemplo, uma lógica de atenuação em rampa de uma alteração de *set-point*), o que nem sempre pode ser aplicado já que por vezes pode ser necessário aumentar ou diminuir rapidamente a vazão por outras questões operacionais.

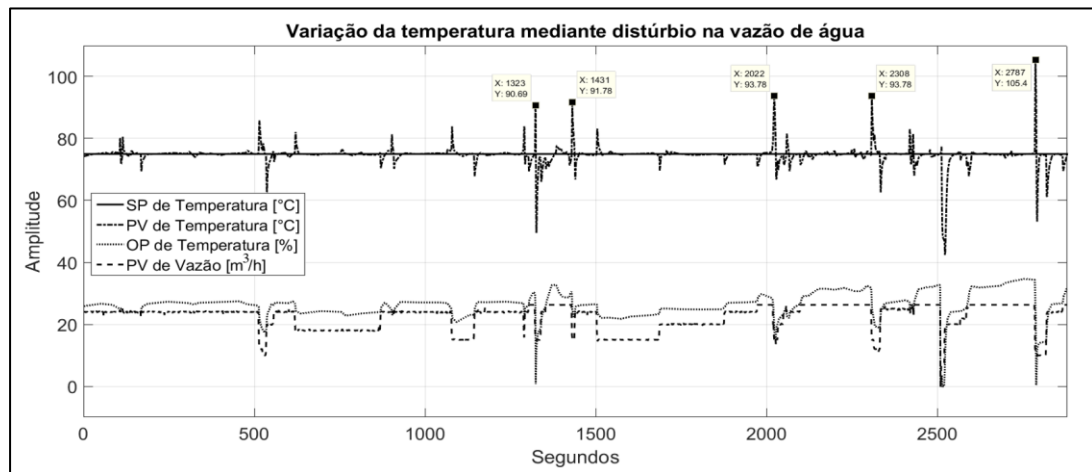


Figura 2: Efeito da variação da vazão de água (distúrbio) no controle de temperatura da água em malha fechada, com controlador PID tradicional, com *set-point* constante.

Dentre as estratégias de controle avançado utilizadas na indústria, o Controle Preditivo DMC (Dynamic Matrix Control) é a técnica que tem apresentado resultados mais satisfatórios, desde a indústria petroquímica, que foi o alvo de seu desenvolvimento, até a aplicação em outras áreas, que incluem plantas químicas, de automação, indústrias aeroespaciais e metalurgias [1]. Neste contexto, a utilização do algoritmo DMC é recomendada, pois é bastante eficaz para processos com atraso [3], onde há ocorrência frequente de *overshooting* e também devido a flexibilidade de aplicação tanto em sistemas monovariáveis como em multivariáveis, além da possibilidade de utilizar restrições nas variáveis de entrada e saída [7].

Nesse trabalho foi realizado um experimento com aplicação de estratégia de controle preditivo DMC para a minimização de *overshooting* em malha de controle de temperatura em um trocador de calor de aquecimento de água com vapor em um caso real da indústria. Foram realizados experimentos reais com a malha de controle de temperatura previamente sintonizada com controlador PID tipo clássico, sendo observada a ocorrência de *overshooting* agudos ao variar-se o *set-point* de vazão de água. Para compensação, foi aplicada lógica de atenuação da mudança de *set-point* de vazão de água (controle automático da variação de *set-point* em rampa), sendo então observada a atenuação satisfatória do *overshooting* somente para os casos em que a rampa de alteração de vazão fora realizada muito lentamente.

Os dados de resposta de temperatura em malha aberta foram então coletados e analisados com o Software Matlab® sendo extraído modelo preditivo DMC considerando duas entradas (vazão de água e sinal de controle da válvula de vapor para o trocador) e uma saída (temperatura da água). No ambiente do Matlab® foi então simulado o processo em malha fechada com a estratégia de controle preditivo DMC em comparação ao controle PID clássico utilizado no processo real.

2 Propósito

A proposta deste trabalho é apresentar o algoritmo de controle preditivo DMC como uma alternativa de controle ao PID clássico de um trocador de calor de aquecimento de água com vapor, com foco em reduzir a ocorrência de *overshooting* da malha de temperatura quando há variações bruscas da vazão de água para o trocador.

3 Métodos

A planta objeto de estudo opera com sistema digital de controle distribuído (SDCD) Delta V®, sistema que agrega diversas ferramentas para otimização de controle. Em seguida foram então realizadas sintonias das malhas de controle de vazão e temperatura utilizando-se o aplicativo de auto-sintonia *Delta V Insight®* agregado ao software do SDCD. As sintonias foram realizadas buscando-se minimizar o *overshooting* da malha de temperatura (servo), e obter-se mínimo tempo de assentamento da malha de vazão de água.

Após sintonia, os parâmetros dos controles PID configurados para as malhas de controle de vazão de água foram: $P=0,2$; $I=14s$ e $D=0s$ e temperatura de água foram: $P=0,26$; $I=97,5s$ e $D=0s$.

3.1 Modelagem

Os modelos matemáticos que relacionam a saída do processo às diferentes entradas foram obtidos separadamente como segue:

Modelo 1: relaciona a variável de saída 1 (temperatura na saída do trocador de calor) com a variável de entrada 1 (sinal de controle da válvula de vapor).

Modelo 2: relaciona a variável de saída 1 (temperatura na saída do trocador de calor) com a variável de entrada 2 (vazão de água que passa pelo trocador de calor).

O Modelo 1 foi obtido através da aplicação de um degrau no sinal de controle da válvula de vapor, com a malha de controle de temperatura em modo aberto (manual), e com o controle de vazão de água em regime estável, e então foram coletados os dados referentes às variações que ocorreram na temperatura (Figura 3-(a)).

A temperatura na saída do trocador de calor também sofre interferência quando é alterada a vazão de água, e desta forma, foi necessário encontrar o Modelo 2, que relaciona essas duas variáveis, aplicando-se um degrau no valor desejado de vazão de alimentação de água com a malha de controle de temperatura em modo aberto (manual) e observando a variação da temperatura (Figura 3b). Como a malha de controle de vazão de água tem resposta muito rápida, o degrau no *set-point* de vazão de água responde equivalentemente a um degrau na vazão medida de água para o trocador.

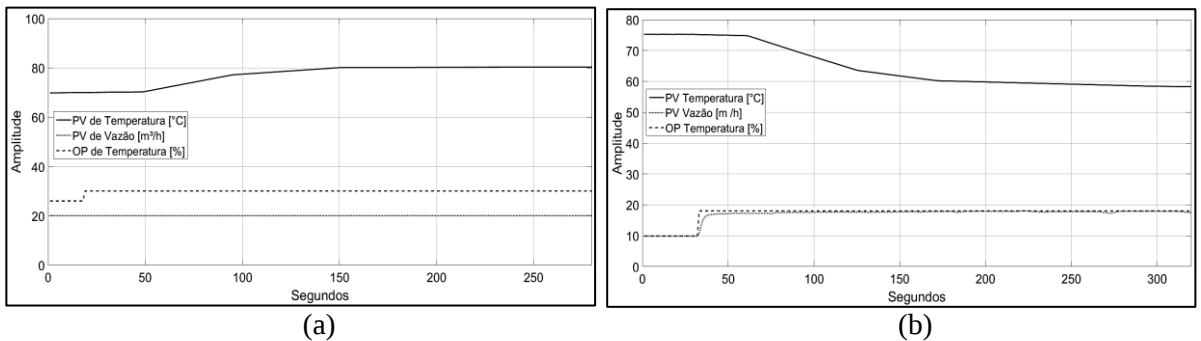


Figura 3: a) Resposta da temperatura ao degrau no sinal de controle da válvula de vapor.
b) Resposta da temperatura ao degrau no fluxo de água.

Os degraus em malha aberta foram realizados diretamente no processo, através da interface supervisória da planta em questão. Os dados da resposta da malha ao degrau foram então copiados do historiador de dados de processo da planta para análise no Matlab®.

Com a utilização do aplicativo Ident do *software* Matlab®, juntamente com alguns ajustes experimentais de tentativa e erro, obtiveram-se os seguintes modelos discretizados para o processo com tempo de amostragem de 1 segundo:

$$\text{Modelo 1}_{(z)} = \frac{0,00474z + 0,004555}{z^2 - 1,885z + 0,8877} \cdot z^{-25} \quad \text{Modelo 2}_{(z)} = \frac{-0,001334z - 0,001303}{z^2 - 1,931z + 0,9324} \cdot z^{-15}$$

Os Modelos 1 e 2 encontrados foram validados através de superposição com a resposta ao degrau realizada em outro momento do processo, como pode-se ver na Figura 4-(a) e 4-(b).

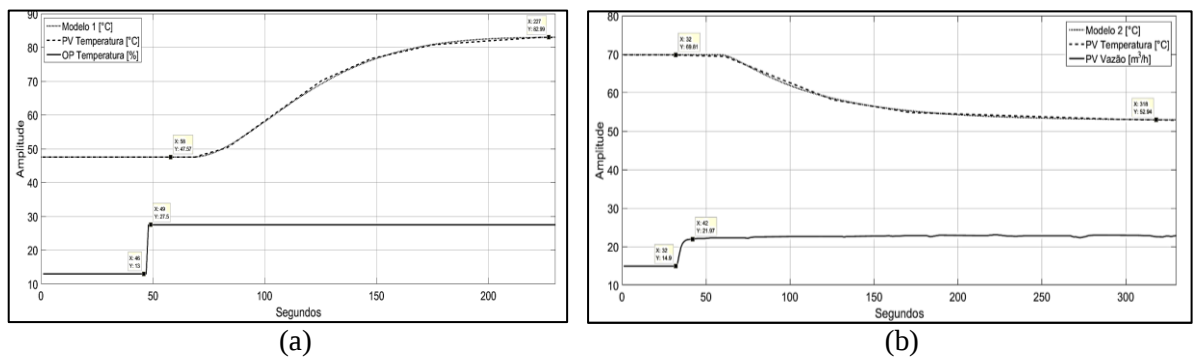


Figura 4: (a) Validação do modelo 1; (b) Validação do modelo 2.

A associação dos dois modelos, relacionando as duas entradas a uma única saída, foi feita através da representação na forma de matrizes [1], como segue abaixo:

$$[y] = \begin{bmatrix} \text{Modelo 1} & \text{Modelo 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

Com isso, obteve-se o comportamento da temperatura (y) diante de mudanças, tanto no sinal de controle da válvula de vapor (u_1), como na vazão de água que passa pelo trocador de calor (u_2).

4 Resultados e Discussões

Nas simulações, o comportamento da temperatura no trocador de calor apresentou valores estáveis, e com rápida resposta de controle mediante aplicação de degrau na referência. Os parâmetros de sintonia utilizados foram inicialmente definidos manualmente através de tentativa e erro, sendo encontrada condição de sintonia satisfatória após poucas tentativas, que seguem: *Horizonte de Previsão* (H_p): 55; *Horizonte de Controle* (H_c): 1; α : 0,4; δ : 1000 e λ : 500.

É sabido, porém que um dos desafios maiores na implementação de estratégias de controle preditivo consiste na determinação adequada dos parâmetros de sintonia. [2] apresentou método de determinação dos parâmetros de sintonia com utilização de algoritmo genético para controle multivariável, onde através da escolha adequada do parâmetro α , obteve não somente resposta satisfatória no controle, mas também a diminuição dos horizontes H_c e H_p , reduzindo com isso o esforço computacional.

A restrição implementada no sinal de controle através no algoritmo DMC MISO foi configurada para permitir abertura máxima da válvula de vapor de 70 %, com taxa variação máxima de sinal em 20 % por segundo, visando preservar a integridade dos equipamentos e a segurança nas operações da planta.

As simulações realizadas com o algoritmo DMC MISO foram comparadas com o controle PID configurado no sistema supervisório Delta V® utilizado na malha de temperatura do trocador de calor.

A Figura 5 apresenta a comparação da resposta servo em malha fechada do controle de temperatura observada no processo real com a resposta simulada no Matlab® para o algoritmo de controle MISO DMC. A resposta da temperatura para o controle preditivo DMC MISO apresentou tempo de assentamento de 37 segundos, contra 413 segundos para a resposta real do PID no Delta V®, considerando-se 2 % de erro. Nenhuma das respostas apresentou *overshooting*, e o tempo morto do processo que é de 23 segundos, foi anulado pela ação antecipatória do controle preditivo.

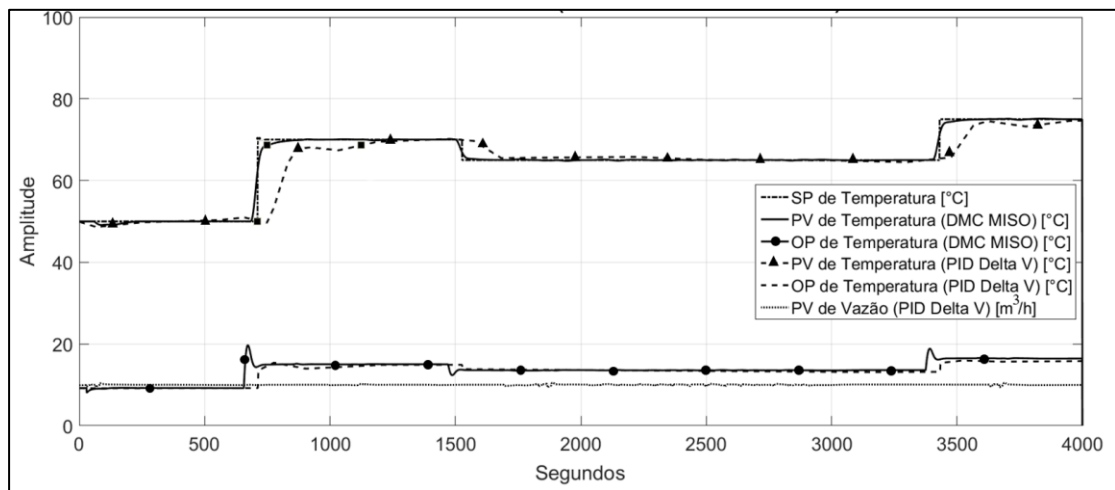


Figura 5: Comparação da resposta servo em malha fechada: resposta real obtida com controle PID clássico implementado no Delta V® e resposta simulada obtida com algoritmo DMC MISO no ambiente do Matlab®.

Para comparação do desempenho do modelo preditivo de controle proposto com o PID clássico em regime regulatório foram realizados os experimentos ilustrados pelas Figuras 6-(a) e 6-(b). Utilizando-se recurso pré-configurado no Delta V® foi aplicada condição de rampa de *set-point* na malha de controle de vazão de água para o trocador, sendo então realizados os dois experimentos:

(i) mudança em degrau da vazão de água (Figura 6-(a)) causou grande variação da temperatura para o controle PID utilizado na planta, chegando a atingir valores acima de 90 °C, sendo que no controle DMC MISO simulado, a temperatura não ultrapassou 83 °C. Além disso, o controle PID reestabeleceu a temperatura desejada com 294 segundos a mais do que o controle preditivo DMC MISO proposto, considerando-se 2 % de erro.

(ii) utilizou-se o recurso da rampa de *set-point* de vazão o controle PID configurado no Delta V® (Figura 6-(b)), somente apresentou *overshooting* próximo à resposta do algoritmo MISO para rampas iguais ou mais lentas que 0,05 m³/h, porém com excessivo tempo de assentamento, considerando-se 2 % de erro.

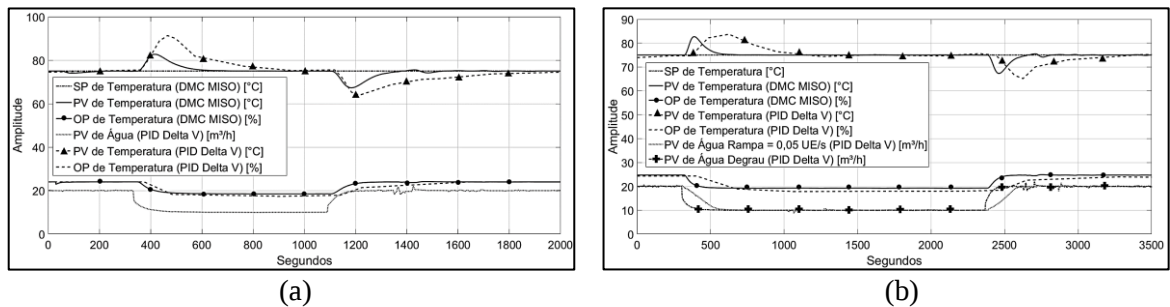


Figura 6: Comparação da resposta regulatória em malha fechada: (a) Degrau (b) Rampa

5 Conclusão

Os resultados dos experimentos realizados foram suficientes para confirmar que o problema de controle estudado tem solução viável e favorável à aplicação de técnicas de controle preditivo.

Comparando-se a performance da malha de controle de temperatura do controle PID utilizado atualmente com o modelo preditivo MISO DMC proposto, para variações de *set-point* de temperatura (servo), apesar de não haver *overshooting* a resposta com controle PID apresenta tempo de assentamento maior em 10 vezes que o obtido com o controle preditivo.

Já comparando as respostas às variações de *set-point* de vazão de água, que causa um distúrbio regulatório na malha de temperatura, não foi obtido um controle PID satisfatório em nenhum dos experimentos realizados. O *overshooting* de temperatura foi significativo enquanto aplicado o controle PID, e a tentativa de atenuação com aplicação de rampa de *set-point* na malha de vazão demonstrou ser necessária rampa muito lenta para evitar um *overshooting* maior que 10 %, inviabilizando essa estratégia de atenuação com rampa. Em contrapartida com o controle preditivo MISO DMC proposto, foi obtido *overshooting* de 10 % e tempo de assentamento de 208 s.

Para trabalhos futuros, está se realizando a implementação do DMC na planta real utilizando (Delta V®), onde estudos comparativos entre o atual controlador PID e o DMC serão realizados.

6 Referências

- [1] G. M. de Almeida e J. L. F. Salles, Controle creditivo: sintonia e aplicações na siderurgia, Cap. 1, vol. 1, (2016).
- [2] G. M. de Almeida, J. D. Filho and F. Rosssomando, Tuning a multivariable predictive control of a hot rolling mill with genetic algorithm. Proceedings of the brazilian symposium of intelligent automation. (2009).
- [3] E. F. Camacho and C. B. Alba, Model predictive control. Springer Science & Business Media, (2013).
- [4] W. B. Correia, Contribuições ao estudo de sistemas SISO e MIMO com atraso de transporte, Tese De Doutorado Em Engenharia Elétrica, UFC, (2016).
- [5] C. B. S. Dutra, Controle preditivo multiobjetivo para processos com atraso. Tese De Doutorado Em Engenharia Elétrica, UFSC, (2003).
- [6] P. D. Moroşan, R. Bourdais, D. Dumur and Jean Buisson, Building temperature regulation using a distributed model predictive control. Energy and Buildings, vol. 42, n. 9, 1445-1452, (2010).
- [7] J. S. Qin and T. A. Badgwell, A survey of industrial model predictive control technology. Control engineering practice, vol. 11, n. 7, 733-764, (2003).