

IHMPC benchmark: Uma Nova Ferramenta para Monitoramento e Avaliação de Desempenho de Controladores Preditivos Multivariáveis

Rodrigo R. Santos*, Oscar A. Z. Sotomayor**

**Coordenadoria de Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial (CCSTAI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS), Campus Lagarto, Rodovia Lourival Batista s/n, Povoado Carro Quebrado CEP 49400-000 Lagarto-SE, Brasil (e-mail: rodrigorbst@gmail.com)*

***Departamento de Engenharia Elétrica (DEL), Universidade Federal de Sergipe (UFS) Av. Marechal Rondon s/n, Jardim Rosa Elze CEP 49100-000 São Cristóvão-SE, Brasil (e-mail: oscars@ufs.br)*

Resumo: O Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC) é um dos sistemas de controle avançado de maior sucesso na indústria, pois os benefícios significativos da aplicação deste controlador são gerados a partir da capacidade do MPC em manter a planta operando dentro das restrições mais rentáveis. No entanto, o MPC, depois de algum tempo em operação, dificilmente funciona como inicialmente fora projetado, pois o seu desempenho deteriora-se com o decorrer tempo. Sendo assim, a fim de preservar as vantagens dos sistemas MPC por um longo período de tempo, o desempenho do controlador precisa ser monitorado e avaliado durante a operação. Destarte, neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma nova ferramenta para monitoramento e avaliação de desempenho de sistemas de controle MPC denominada de IHMPC *benchmark*. Os resultados de simulações numéricas da ferramenta desenvolvida aplicada nos controladores MPC do processo de separação trifásica e da coluna de destilação Wood-Berry, sob as condições típicas de degradação do desempenho, mostram o potencial da ferramenta para a avaliação de sistemas MPC, oferecendo uma solução apropriada e fornecendo subsídios para implementações em sistemas industriais reais.

Palavras-Chaves: Avaliação de desempenho, Controle MPC, IHMPC Benchmark, Processo de tratamento primário de petróleo, Coluna de destilação Wood-Berry.

1. INTRODUÇÃO

Em controle avançado de processos, o controlador preditivo ou MPC (*Model Predictive Control*) pode ser considerado como a mais importante inovação dos últimos anos e a ferramenta padrão para aplicações industriais (Qin e Badgwell, 2003). O retorno do investimento e os benefícios significativos da aplicação desses controladores são gerados a partir da habilidade do controlador MPC de manter a planta operando dentro das suas restrições de forma mais lucrativas.

O MPC tornou-se popular em aplicações industriais por ser direta a implementação de controle multivariável, podendo aceitar processos retangulares, ou seja, com número de entradas diferente do número de saídas; também por trabalhar com restrições nos atuadores e ponderações nas variáveis de saída do processo; ainda, por considerar distúrbios medidos; além disso, por associar objetivos econômicos ao problema de controle e, finalmente, por trabalhar com *targets* (alvos ótimos) e controle por faixa (Julien et al., 2004). Por essas razões, as estratégias de controle MPC, tais como as baseadas no controle por matriz dinâmica (*Dynamic Matrix Control*, DMC), têm-se tornado o padrão em aplicações de controle avançado na indústria de processos, como na indústria química e na petroquímica (Qin e Badgwell, 2003).

Entretanto, como todo algoritmo de controle, o MPC depois de algum tempo em operação dificilmente funciona como

quando fora inicialmente projetado (comissionado). O desempenho do controlador deteriora-se com o decorrer do tempo sendo comum encontrar aplicações MPC e RTO (*Real-Time Optimization*) funcionando muito aquém da capacidade original depois de 2 ou 3 anos da sua implementação (Treiber et al., 2003).

A taxa de degradação no desempenho dos controladores MPC deve-se a diversos fatores, tais como: mudança na dinâmica do processo, má sintonia do controlador, perturbações não medidas no processo, estrutura de controle inadequada e falhas na instrumentação (Morari e Lee, 1999). Em geral, esses problemas aumentam no decorrer do tempo e movem o ponto de operação para outro diferente do ponto original, fazendo com que o erro planta/modelo seja mais acentuado, levando a uma degradação significativa do desempenho do controle (Conner e Seborg, 2005). Destarte, com o objetivo de manter os benefícios dos sistemas MPC por um longo período de tempo, o desempenho do controlador precisa ser monitorado e avaliado em uma base constante. Esta tarefa requer a presença de ferramentas efetivas e confiáveis para detectar quando o desempenho do controlador estiver abaixo do desejável para definir a necessidade, ou não, de um recomissionamento do sistema de controle.

Os métodos de monitoramento e avaliação de desempenho (CPMA) de controladores industriais têm como objetivo

fundamental verificar se o controlador está trabalhando de maneira satisfatória. Para isto, as técnicas de CPMA, explícita ou implicitamente, incorporam uma comparação da qualidade do controlador atual com a qualidade de um padrão ou *benchmark*. O *benchmark* define o modelo comportamental das variáveis do processo e, quando comparado com o valor real medido, permite realizar a avaliação de desempenho do controlador.

Para sistemas MPC, um dos métodos de CPMA propostos na literatura técnica é o LQG (*Linear-Quadratic-Gaussian benchmark*) (Huang e Shah, 1999), o qual usa o modelo do processo disponível em uma forma similar ao MPC. Este *benchmark* se traduz em uma curva de compensação (*tradeoff*), que representa o limite de desempenho ótimo em termos das variâncias de entrada e de saída do processo. Entretanto, conforme exposto em Santos e Sotomayor (2013), o LQG *benchmark* original não pode ser diretamente aplicado na avaliação de desempenho de controladores preditivos, pois a função objetivo utilizada no controle LQG, para gerar a curva de compensação, não é compatível com a função objetivo de um controlador preditivo típico, uma vez que não leva em consideração os pesos nas restrições das saídas, os pesos nas supressões das entradas e o modelo do processo no formato incremental. Estas diferenças alteram as variâncias de entrada e de saída do processo, comprometendo a aplicabilidade do LQG *benchmark* original como padrão de comparação de desempenho do MPC. Para contornar esta situação, Santos (2013) propôs o LQG *benchmark* Modificado, que é uma aproximação mais realística de um MPC típico.

Tendo em vista a obter resultados mais aproximados com o desempenho real de controladores MPC, no presente trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma nova ferramenta para monitoramento e avaliação de desempenho do MPC, denominada de IHMPC *benchmark*, fundamentada nos princípios do LQG *benchmark* Modificado e na teoria do Controlador Preditivo de Horizonte Infinito (IHMPC), tendo em vista a levar em consideração a estabilidade garantida, que é dada pela equação de Lyapunov.

2. IHMPC Benchmark

O desenvolvimento do IHMPC *Benchmark* foi baseado nos mesmos procedimentos realizados no LQG *Benchmark* Modificado (Santos e Sotomayor, 2013), entretanto, a função objetivo adotada no desenvolvimento deste *benchmark* foi a do IHMPC. Dessa forma, a função objetivo do novo *benchmark* torna-se da forma apresentada em (1).

$$J_{IHMPC} = E \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} (y_i^T Q y_i + \Delta u_i^T (\lambda R) \Delta u_i) + x_N^T \bar{Q} x_N \right\} \quad (1)$$

Sendo, x o vetor de estado, y o vetor das saídas, Δu o vetor de incremento das entradas, Q a matriz de ponderação das saídas, R a matriz de supressão das entradas, N o horizonte do *benchmark*, \bar{Q} a matriz de ponderação do estado terminal e λ parâmetro da função objetivo.

A formulação de \bar{Q} dependerá se há, ou não, modos instáveis no modelo do processo. Caso não haja, pode-se formulá-la

conforme presente em (2), obtida através das matrizes A e C do modelo do processo e da matriz de ponderação Q do controlador preditivo, sendo esta equação conhecida como equação discreta de Lyapunov.

$$A^T \bar{Q} A - \bar{Q} = -C^T Q C \quad (2)$$

No entanto, caso existam modos instáveis no modelo do processo, deve-se impor restrições para que os modos instáveis sejam iguais a zero no final do horizonte de controle (Muske e Rawlings, 1993). Dessa forma, faz-se a decomposição do sistema em partes estável e instável, através da decomposição da matriz A do modelo em espaço de estados na forma normal de Jordan, conforme apresentado em (3), sendo o índice u indicativo do modo instável e s indicativo do modo estável.

$$A = W J W^{-1} = [W_u \quad W_s] \begin{bmatrix} J_u & 0 \\ 0 & J_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{W}_u \\ \tilde{W}_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

Assim, para sistema instáveis a matriz de ponderação do estado terminal é dada por (4).

$$\bar{Q} = W_s^T \Sigma \tilde{W}_s \quad (4)$$

Sendo, a matriz Σ obtida através de (5).

$$J_s^T \Sigma J_s - \Sigma = -W_s^T C^T Q C W_s \quad (5)$$

A partir do sistema em espaço de estados, pode-se manipular (1) de forma a obter (6), que representa a função objetivo do IHMPC *Benchmark* em termos da saída do processo com a entrada na forma incremental.

$$J_{IHMPC} = y^T(0|N) \cdot Q_{IH} \cdot y(0|N) + \Delta u^T(0|N) \cdot \lambda R_{IH} \cdot \Delta u(0|N) \quad (6)$$

Sendo,

$$Q_{IH} = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & (C^+)^T \bar{Q} (C^+) \end{bmatrix} \quad R_{IH} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Onde C^+ é a pseudoinversa da matriz C do modelo do processo.

Com o uso do modelo do processo na forma incremental (disponível do MPC ou obtido por identificação em malha fechada), obtém-se a curva de compensação, minimizando a função objetivo (6) de forma a encontrar os valores ótimos das variâncias da ação de controle e da saída do processo. Estas variâncias são dadas, respectivamente, por (7) e (8).

$$var [\Delta u(k)] = \sum_{i=0}^N \psi_i var [e(k)] \psi_i^T \quad (7)$$

$$var [y(k)] = \sum_{i=0}^N \gamma_i var [e(k)] \gamma_i^T \quad (8)$$

Sendo: $\psi = -[L_u^T \cdot Q_{IH} \cdot L_u + \lambda R_{IH}]^{-1} [L_u^T \cdot Q_{IH} \cdot L_e]$

$\gamma = [-L_u [L_u^T \cdot Q_{IH} \cdot L_u + \lambda R_{IH}]^{-1} [L_u^T \cdot Q_{IH}] + I] \cdot L_e$

$$L_u = \begin{pmatrix} D & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CB & D & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & D & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ CA^{N-2}B & CA^{N-3}B & CA^{N-4}B & \dots & D \end{pmatrix}$$

$$L_e = \begin{pmatrix} I \\ CK \\ CAK \\ \vdots \\ CA^{N-2}K \end{pmatrix}$$

Sendo as matrizes A , B , C , D e K obtidas do modelo do processo em espaço de estados na forma incremental e $e(k)$ o ruído presente no processo.

A partir da variação do parâmetro λ da função objetivo podem ser determinados diversos valores ótimos, os quais são utilizados para gerar a curva de compensação, como apresentada na Figura 1, que representa o limite máximo de desempenho do controlador, em termos das variâncias do processo.

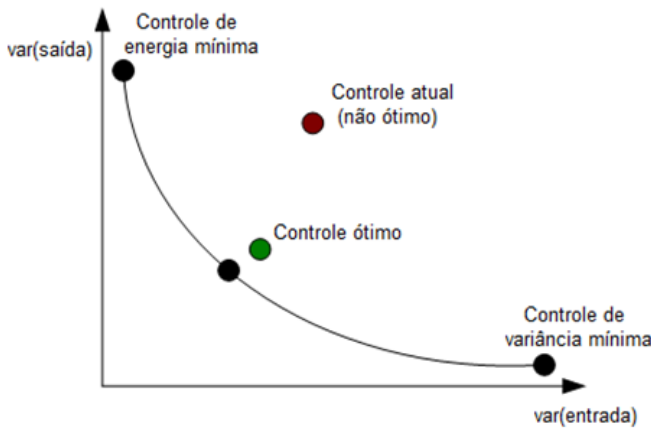


Fig. 1. Curva de compensação do IHMPC benchmark.

Como o controle MPC, que é um controlador linear, somente pode trabalhar na região acima da curva, então podem ser obtidos índices de desempenho do controlador, tais como o índice de variação da entrada, o índice de variação da saída e os índices de máxima melhoria possível.

No entanto, de forma a avaliar o controlador de uma forma geral, Santos e Sotomayor (2013) propuseram o Índice de Desempenho Global (I_G) do MPC, que avalia o controlador considerando as variâncias de entrada e de saída simultaneamente e considerando a menor distância entre o ponto de desempenho atual ($V_{\Delta u}$, V_y) com a curva de compensação, como ilustrado na Figura 2. Esse índice é modelado matematicamente como exposto em (9).

$$I_G = \frac{\|V_{\Delta u}^p, V_y^p\|}{\|V_{\Delta u}, V_y\|} \quad (9)$$

Sendo: $V_{\Delta u}^p$ e V_y^p o ponto da curva de compensação mais próximo do ponto de desempenho atual ($V_{\Delta u}$, V_y), $\|V_{\Delta u}^p, V_y^p\|$ norma do vetor ($V_{\Delta u}^p, V_y^p$) e $\|V_{\Delta u}, V_y\|$ norma do vetor ($V_{\Delta u}, V_y$).

O índice de desempenho geral possui variação de valor entre 0 e 1. Caso I_G possua tendência para 1, dada as variâncias da entrada e da saída, então o controlador estará operando no desempenho ideal com respeito as variâncias do processo, uma vez que é um indicativo que o ponto de desempenho está próximo da curva de compensação, isto é, a norma do vetor ($V_{\Delta u}^p, V_y^p$) é aproximadamente igual a norma do vetor ($V_{\Delta u}, V_y$). Já se a tendência do I_G for para 0, ou seja, quando o ponto de desempenho ($V_{\Delta u}, V_y$) estiver muito distante da curva de compensação, então o desempenho não será ideal e haverá espaço para melhorias. Neste caso, deve-se avaliar, individualmente, os índices de desempenho da saída e da entrada.

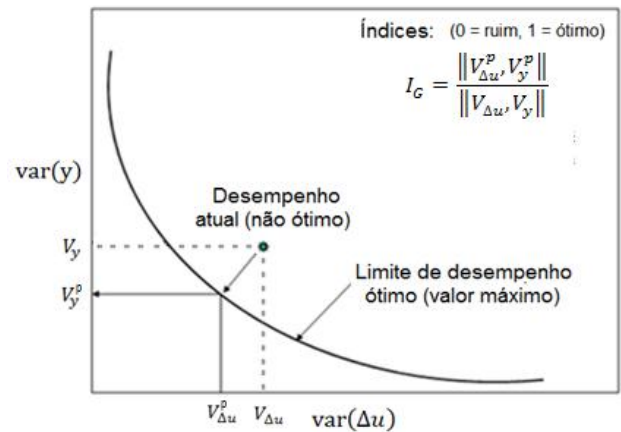


Fig. 2. Índice de desempenho global do IHMPC Benchmark.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O IHMPC benchmark foi aplicado nos controladores MPC do processo de tratamento primário de petróleo e da coluna de destilação Wood-Berry, sob as condições típicas de degradação do desempenho, tendo a vista a avaliar, via simulações numéricas, o comportamento do índice de desempenho do controlador MPC.

Nos dois processos, os testes da aplicação do IHMPC benchmark no controlador MPC foram divididos em quatro casos: condições ideais (caso 1), modelo degradado do processo (caso 2), presença de perturbação não medida (caso 3) e sintonia do controlador inadequada (caso 4).

O MPC é do tipo QDMC (*Quadratic Dynamic Matrix Control*) de García e Morshedi (1986), amplamente usado na indústria petroquímica e de petróleo e gás (Qin e Badgwell, 2003).

3.1 Processo de Tratamento Primário de Petróleo

Nas plataformas de produção offshore, as operações do tratamento primário de petróleo iniciam-se na unidade de separação. A interligação direta dessa unidade aos poços de produção a faz responsável por absorver as flutuações da corrente de alimentação ou golfadas, como também promover a separação do fluido multifásico (composto principalmente de água, óleo e gás) em suas diferentes fases. Neste estudo, a unidade de separação é composta por um separador de produção trifásico associado com uma bateria de três hidrociclones em série.

O controle da unidade de separação é um problema multivariável e, no presente caso, o sistema de controle MPC opera como parte integrante de uma estrutura de controle hierárquica, onde no nível superior o controlador MPC atua nos controladores PI que por sua vez atuam no processo. As variáveis manipuladas e controladas do MPC são os *setpoints* e as variáveis controladas dos PI's, correspondentes à pressão no separador (P), nível da fase oleosa na câmara de óleo (h_i) e nível da interfase água-óleo na câmara de separação (h_w), respectivamente, conforme indicado na Figura 3.

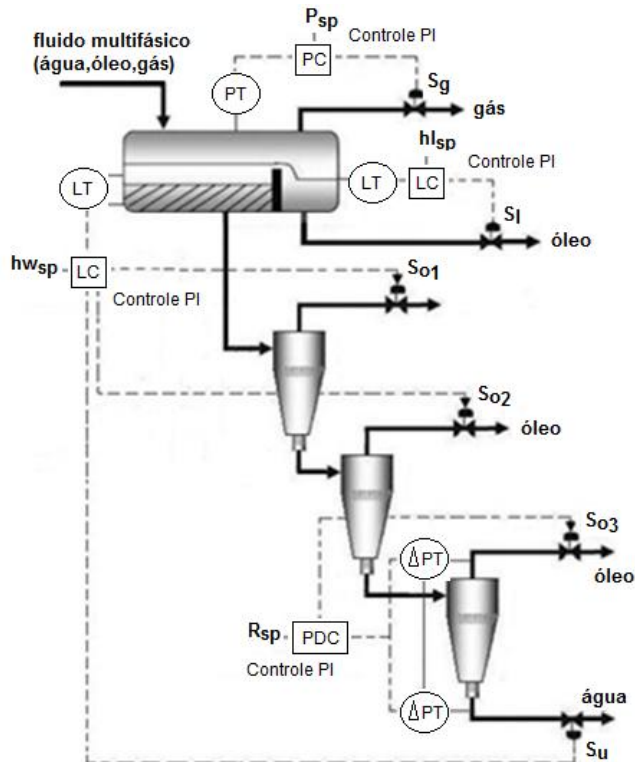


Fig. 3. Unidade de separação trifásica (Santos, 2013).

O simulador da unidade de separação utilizado neste trabalho foi implementado na plataforma Simulink/Matlab®. Este simulador é baseado em modelos fenomenológicos disponíveis na literatura. Maiores informações podem ser encontrados em Azevedo Jr. e Sotomayor, (2010). Detalhes da implementação e ajuste do controlador MPC são encontrados em Santos e Sotomayor (2012a,b).

Na Figura 4 é apresentada a comparação dos valores do índice de desempenho global do controlador MPC no caso 1 e no caso 2. Cada valor do índice equivale ao desempenho do controlador MPC dentro de um horizonte com 20 amostras. Verifica-se que o índice de desempenho do MPC operando com o modelo adequado são maiores, consequentemente melhores, que o MPC operando com o modelo degradado. O valor do índice de desempenho maior significa que o controlador está operando mais próximo da curva de desempenho ótimo. Caso o valor do índice diminua, como nos resultados obtidos do MPC trabalhando com modelo degradado (caso 2), significa que o desempenho do controlador se afastou da curva de compensação, dessa forma constata-se diminuição no desempenho operacional do MPC.

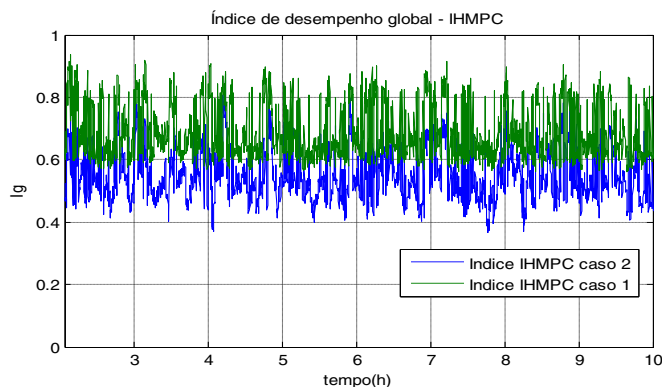


Fig. 4. Comparação entre os índices de desempenho global do IHMPC no caso 1 (condições ideais) e no caso 2 (modelo degradado).

No caso 3 foi considerada perturbação no fluxo multifásico de alimentação do vaso separador, em regime de golfadas, sendo os resultados do desempenho do MPC apresentados na Figura 5. A perturbação no fluxo de entrada do processo prejudicou consideravelmente o desempenho do MPC, pois em vários momentos o desempenho do controlador foi degradado, notadamente no momento em que a golfada entra no processo. É importante verificar que o desempenho do MPC na ausência das golfadas é praticamente igual ao caso 1 (ideal).

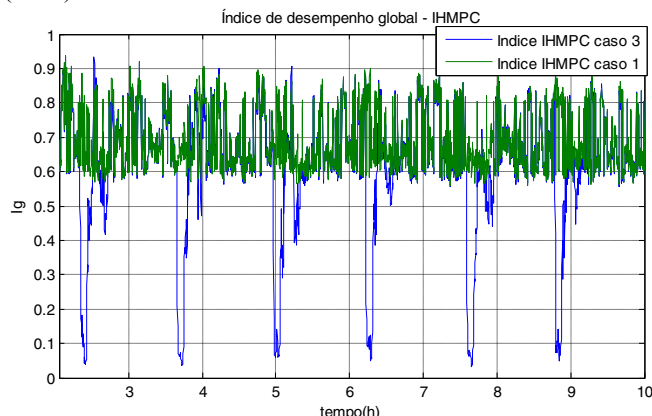


Fig. 5. Comparação entre os índices de desempenho global do IHMPC Benchmark no caso 1 (condições ideais) e no caso 3 (com perturbação).

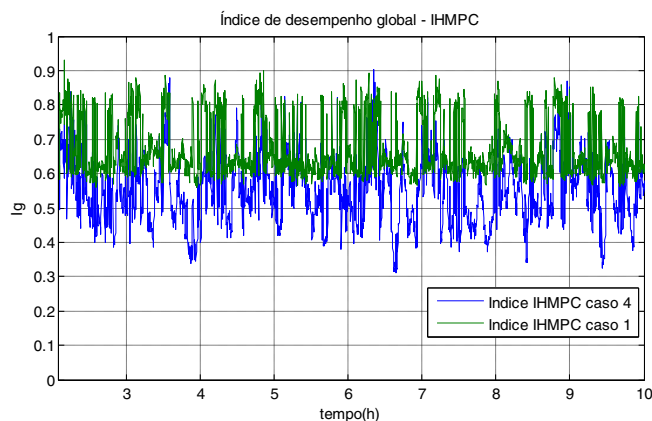


Fig. 6. Comparação entre os índices de desempenho global do IHMPC Benchmark no caso 1 (condições ideais) e no caso 4 (sintonia inadequada).

De forma a avaliar os efeitos de uma sintonia inadequada do controle MPC, os valores dos parâmetros de sintonia do MPC

foram alterados, com relação à sintonia adequada do caso 1. Na figura 6 é apresentado o índice de desempenho global do MPC, sendo constatado diminuição no desempenho do controle MPC, uma vez que os valores do índice de desempenho são menores. Dessa forma, verifica-se novamente que o IHMPC *Benchmark* conseguiu detectar alteração no desempenho do MPC, dessa vez relacionado à sintonia inadequada do controlador MPC.

3.2 Coluna de Destilação Wood-Berry

Uma coluna de destilação consiste em um processo destinado à operação de destilação fracionada, de forma a alcançar a separação efetiva usando uma coluna vertical ligada ao recipiente de destilação. O vapor do líquido vai subindo a coluna até que condensa voltando ao recipiente. O vapor na coluna possui componentes mais voláteis em direção ao topo e componentes menos voláteis na base, podendo-se retirar várias frações da mistura de entrada em diversos pontos da coluna. Industrialmente, as colunas de destilação consistem em grandes torres contendo vários andares. Estas colunas são usadas frequentemente nas refinarias de petróleo.

Para exemplificar a metodologia proposta, foi utilizada a coluna de destilação Wood-Berry, conforme mostrado na Figura 7, que é um caso clássico para simulação de um sistema multivariável de uma coluna de destilação que separa metanol e água. O modelo Wood-Berry é uma função de transferência 2×2 da coluna de uma planta piloto de destilação que separa metanol e água. A mistura de entrada alimenta a coluna de destilação. O produto de topo é o metanol destilado e o produto do fundo é composição aquosa. O MPC controla a taxa de vazão de entrada para atender aos níveis de concentração desejados. Maiores informações do processo consultar Wood e Berry (1973). O processo simulado da coluna de destilação utilizado neste trabalho foi implementado na plataforma Simulink/Matlab®.

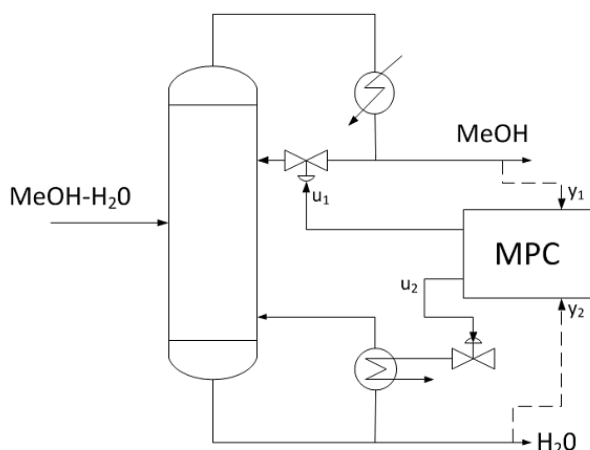


Fig. 7. Diagrama do processo da coluna de destilação Wood-Berry.

Na Figura 8 é apresentada a comparação do índice de desempenho global do MPC, indicado pelo IHMPC *Benchmark*, quando operando no caso 1 (referência) e no caso 2 (modelo degradado), sendo verificado que o índice de desempenho do MPC operando com o modelo adequado são maiores, consequentemente melhores, que o MPC operando com o modelo degradado. Sendo assim, a ferramenta de

avaliação conseguiu detectar diminuição no desempenho do MPC na degradação do modelo do processo.

Para a análise do caso 3, adicionou-se um nível extra de distúrbio no modelo do processo entre um tempo especificado na simulação numérica, mais precisamente entre 150 a 350 min. A adição desse distúrbio teve por objetivo verificar se a ferramenta desenvolvida consegue detectar degradação do desempenho do MPC nessa situação. Na Figura 9 é apresentado o índice de desempenho global do MPC, sendo constatado que a influência da perturbação não medida prejudicou o desempenho do MPC, pois entre os tempos 150 a 350 min, quando havia presença da perturbação, o desempenho do MPC esteve abaixo do caso de referência. É importante constatar que o desempenho do MPC na ausência da perturbação adicionada é praticamente igual ao caso 1 (ideal). Os resultados obtidos são satisfatórios com relação ao objetivo da ferramenta desenvolvida, pois a partir do índice de desempenho global é possível detectar um distúrbio degradante de desempenho do controlador MPC.

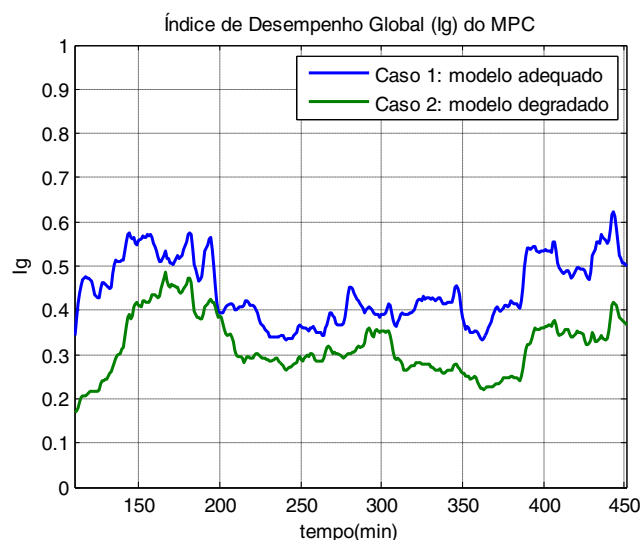


Fig. 8. Comparação do índice de desempenho global do MPC da coluna Wood-Berry no caso 1 e no caso 2.

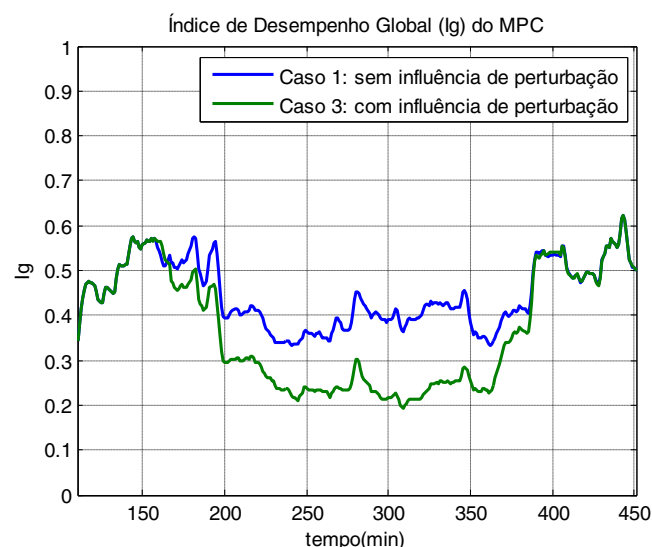


Fig. 9. Comparação do índice de desempenho global do MPC da coluna de destilação no caso 1 e no caso 3. (distúrbio entre os tempos 150 a 350 min.)

Para o caso 4, apresenta-se na Figura 10 o índice de desempenho global, sendo constatado que houve diminuição no desempenho do controle MPC, pois os índices associado ao MPC com sintonia inadequada foram menores que o caso de referência. Sendo assim, novamente verifica-se que o IHMPC *Benchmark* pode ser utilizado como uma referência comportamental para a análise de desempenho de controladores preditivos, pois mesmo no caso de mudança de sintonia do MPC a ferramenta desenvolvida conseguiu detectar diminuição no desempenho do QDMC.

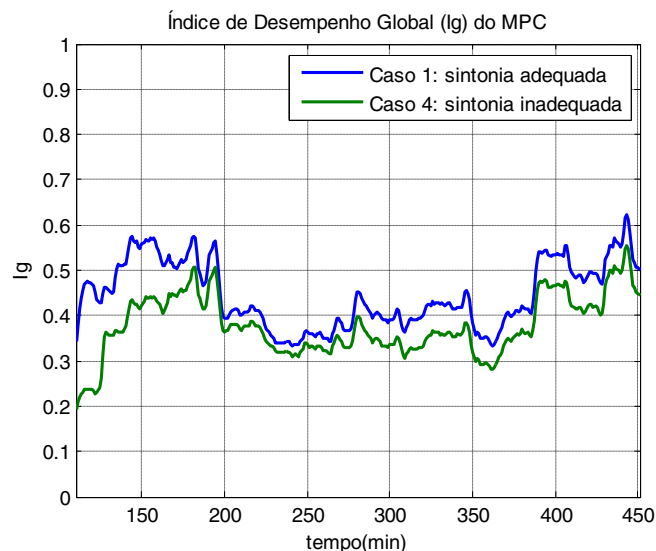


Fig. 10. Comparação do índice de desempenho global do MPC da coluna de destilação no caso 1 e no caso 4.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida a ferramenta IHMPC *Benchmark* para o monitoramento e avaliação de desempenho de controladores preditivos multivariáveis, sendo essa ferramenta aplicada na avaliação do MPC do processo de tratamento primário de petróleo e do MPC da coluna de destilação Wood-Berry. O *Benchmark* desenvolvido calcula o índice de desempenho global do controlador considerando a variabilidade da tanto da entrada e quanto da saída.

A partir dos resultados das simulações numéricas realizadas, verificou-se que o IHMPC *Benchmark* proposto neste trabalho pode ser utilizado como uma referência comportamental para a análise de desempenho de controladores MPC. Constatou-se no estudo de caso que na degradação do modelo do processo, na presença de perturbações não medidas e na alteração na sintonia do MPC, o IHMPC *Benchmark* conseguiu detectar desempenho inferior do MPC, que é o primeiro indicativo para realização de reajustes no sistema de controle.

Com o interesse crescente no desenvolvimento de novas metodologias para avaliação de desempenho de controladores industriais MPC, os resultados apresentados neste trabalho, para diversos casos de operação do sistema de controle MPC, mostram a eficiência da metodologia proposta e seu potencial para aplicações industriais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o auxílio financeiro do projeto UFS-UFRN-Petrobras "AIPetro" e do Programa de Recursos Humanos PRH/ANP/UFS-45.

REFERÊNCIAS

- Azevedo Jr, David O.; Sotomayor, Oscar A. Z. (2010). Controle de escoamentos no regime de golfadas em processos de produção de petróleo, *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, Buenos Aires-Argentina, v. XXIX, p.8447-8461.
- Conner, J.S. and Seborg, D.E. (2005) "Assessing the need for process re-identification". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v.44, p.2767-2775.
- Garcia, C.E. and Morshedi, A.M. (1986). Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC)", *Chemical Engineering Communications*, v.46, p.73-87.
- Huang, B. and Shah, S.L (1999). *Performance assessment of control loops: theory and applications*, 1ª edição, Editora: Springer, London-UK.
- Julien, R.H., M.W. Foley and W.R. Cluett (2004). Performance assessment using a model predictive control benchmark, *Journal of Process Control*, v.14, p.441-456.
- Morari, M., Lee, J.H. (1999). Model predictive control: past, present and future. *Computers and Chemical Engineering*, v.23(4), p.667-682.
- Muske, Kenneth R. and Rawlings, James B. (1993). Model Predictive Control with Linear Models. *Process Systems Engineering*, v.39,p.262-287.
- Qin, S.J. and Badgwell, T.A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, v.11(7), p.733-764.
- Santos, Rodrigo R.; Sotomayor, Oscar A. Z. (2012a). MPC com controle das saídas por faixas de um processo de produção de petróleo offshore", *XIX Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, Campina Grande-PB, Brasil, p.5074-5080.
- Santos, Rodrigo R.; Sotomayor, Oscar A. Z. (2012b) "Controle hierárquico de um sistema de tratamento primário de petróleo", *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2012*, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- Santos, Rodrigo R. (2013). *Avaliação de desempenho de controladores preditivos multivariáveis*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão-SE, Brasil.
- Treiber, S., Sttelmaier, R. and Starling, M. (2003). "Sustaining benefits of process automation". *AIChE Spring National Meeting*, New Orleans-LA.
- Wood, R. K. And Berry, M. W. (1973). *Terminal composition control of a binary distillation column*. *Chem. Eng. Sci.*, v.28, p.1707-1717.