

# AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE SINTONIAS DO DMC

H. C. OYAMA<sup>1</sup>, L. C. OLIVEIRA-LOPES<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química  
E-mail para contato: henrique.oyama@ufu.br

**RESUMO** – A sintonia de algoritmos de controle multivariáveis, em especial para o MPC, caracterizado pela complexidade nas combinações dos efeitos de seus parâmetros, ainda é palco de estudos para contribuir no desempenho e robustez dessa categoria de controladores. Nesse viés, o objetivo deste trabalho foi investigar diretrizes de sintonias do controlador preditivo DMC e selecionar a melhor metodologia através de índices de desempenho (ITAE e RMS). Os métodos mais convenientes atestados aos problemas servo e regulador foram o M3 e o M7 (uma extensão de M3) aplicados ao sistema SISO e MIMO, respectivamente.

## 1. INTRODUÇÃO

Nas décadas recentes, o Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC) se consagrou como a forma mais insigne de controle avançado no setor industrial, sendo que o controlador do tipo Controle por Matriz Dinâmica (DMC) em horizonte finito é considerado um dos algoritmos mais populares utilizados na indústria química (Shridhar e Cooper, 1998).

Apesar do conjunto de vantagens do MPC descritas por Campos, Gomes e Perez (2013), a dependência do modelo do processo e, em especial, a elevada combinação de parâmetros de sintonia constituem os grandes reptos da área. Assim, como é comum na literatura e em razão da dificuldade de definição de índices de desempenho em operações com restrições ativas, este trabalho tem como objetivo investigar e avaliar métodos de sintonia de controladores preditivos (DMC) sem restrições para o Horizonte de Predição e Horizonte de Controle, e cotejar os resultados das diversas diretrizes através de índices de desempenho (ITAE e RMS).

## 2. A LEI DE CONTROLE DO DMC

O problema de otimização em horizonte finito do MPC é resolvido através da minimização de uma função custo ( $J$ ), dada pela Equação 1, aqui avaliada sem restrições, modificada para penalizar os erros das variáveis de maior importância ao processo; e a Equação 2 que representa a lei de controle obtida para o caso de um problema multivariável, com  $ny$  variáveis controladas e  $nu$  variáveis manipuladas (Campos, Gomes e Perez, 2013).

$$\min_{\Delta U} J = E^T W^T W E + \Delta U^T R \Delta U \quad (1)$$

$$\Delta U = (S^T W^T W S + R)^{-1} S^T W^T W (w - f) \quad (2)$$

Os principais parâmetros de sintonia do controlador preditivo do tipo DMC são: Horizonte de Predição ( $H_p$ ); Horizonte de Controle ( $H_c$ ); pesos nas variáveis manipuladas ( $R$  – Matriz de Supressão de Movimento) e pesos nas variáveis controladas ( $W$  ou *Equal Concern*,  $EC=1/W$ ).

## 2.1. Sintonia para o DMC

Para este estudo preliminar, os pesos nas variáveis controladas foram fixados no valor unitário e a Matriz de Supressão de Movimento foi definida pelo método de Shridhar e Cooper (1998), conforme a Equação 3.

$$R_s = \frac{H_c}{500} \sum_{r=1}^{ny} \left[ W_r K_{rs}^2 \left\{ H_p - k_{rs} - \frac{3}{2} \frac{\tau_{rs}}{T_s} + 2 - \frac{(H_c-1)}{2} \right\} \right], s=1, 2, \dots, nu; r=1, 2, \dots, ny \quad (3)$$

Os métodos de sintonia para o DMC foram avaliados em dois cenários, monovariável (SISO) e multivariável (MIMO), e com tempo de amostragem  $T_s$ , de acordo com as diretrizes da Tabela 1.

Tabela 1 – Métodos de Sintonia do Horizonte de Predição e Horizonte de Controle.

Método	Valor ou Banda	Sistema	Referência
M1	$H_p = (t_{60} + t_{95})/T_s - 1$ $H_c = t_{60}/T_s$	MIMO	Georgiou, Georgakis e Luybes, 1988
M2	$H_p = H_c + N$	MIMO	Cutler, 1983, apud Maurath, Mellichamp e Seborg, 1988, p.958
M3	$H_p = (5\tau_c + td)/T_s$ $H_c = \tau_c/T_s$	SISO	Hinde Jr e Cooper, 1994
M4	$H_p = \max(5\tau_{rs}/T_s + k_{rs})$ $H_c = \max(\tau_{rs}/T_s + k_{rs})$ $k_{rs} = t_{d,rs}/T_s + 1$	MIMO	Shridhar e Cooper, 1998
M5	$H_p = [(t_{80} + t_{90})/2]/T_s$	MIMO	Maurath et al., 1988
M6	$H_p > H_c + td/T_s$	SISO	Maurath, Mellichamp e Seborg, 1988
M7	$H_p = \max(5 \max(\tau_{rs}) + \min(t_{d,rs})/T_s)$ $H_c = \max(\tau_{rs})/T_s$	MIMO	Adaptado de M3
M8	$H_p > H_c + \min(t_{d,rs})/T_s$	MIMO	Adaptado de M6

## 2.2. Índices de Desempenho de Sistemas Controlados

Os índices de desempenho adotados nesse trabalho foram a integral ponderada pelo tempo para o valor absoluto do erro (ITAE) e a raiz do erro quadrático médio (RMS), indicadas na forma discretizada pelas Equações 4 e 5, respectivamente.

$$ITAE = \sum_{k=0}^T k|e(k)| \quad (4)$$

$$RMS = \sqrt{1/(T+1) \sum_{k=0}^T e(k)^2} \quad (5)$$

Em que  $T$  representa o número de  $T_s$  correspondente ao tempo total avaliado.

## 2.3. Avaliação dos Sistemas Controlados

O sistema de controle SISO investigado corresponde ao controle de um processo estável de um trocador de calor, conforme apresentado por Camacho e Bordons (1999). O tempo de amostragem foi de 0,6 segundos e a relação entre a temperatura de saída (Y) e a vazão de entrada no trocador de calor (u) é dada pela função de transferência da Equação 6. Avaliaram-se as diversas sintonias com base nos índices de desempenho ITAE e RMS aplicados a um problema servo, em que se realizou uma perturbação degrau unitário no *setpoint* no instante 5, e a um problema regulador, no qual se introduziu uma perturbação no estado da planta no instante 10.

$$P(s) = \frac{0,12 e^{-3s}}{1+6s} \quad (6)$$

Para a avaliação do problema de controle de um sistema estável MIMO foi investigado o processo de uma coluna de destilação. O fracionador de óleo pesado descrito por Camacho e Bordons (1999) apresenta três variáveis controladas - composição do produto no topo (Y1), composição do produto no prato intermediário (Y2) e temperatura no fundo da coluna (Y3) - e três variáveis manipuladas - taxa de retirada no topo (u1), taxa de retirada no prato intermediário (u2) e refluxo no refeedor (u3). O tempo de amostragem foi de 4 minutos e a dinâmica do processo pode ser caracterizada pelo sistema a seguir (com Número de Condicionamento de 24,33):

$$\begin{bmatrix} Y1(s) \\ Y2(s) \\ Y3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4,05e^{-27s}}{1+50s} & \frac{1,77e^{-28s}}{1+60s} & \frac{5,88e^{-27s}}{1+50s} \\ \frac{5,39e^{-18s}}{1+50s} & \frac{5,72e^{-14s}}{1+60s} & \frac{6,9e^{-15s}}{1+40s} \\ \frac{4,38e^{-20s}}{1+33s} & \frac{4,42e^{-22s}}{1+44s} & \frac{7,2}{1+19s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u1(s) \\ u2(s) \\ u3(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Como critério de avaliação, adotou-se o mesmo do caso SISO, sendo que os índices de desempenho foram calculados pela combinação dos respectivos ITAE e RMS para as variáveis controladas e manipuladas, segundo as Equações 8 e 9, em que  $\beta_i$  e  $\gamma_i$  correspondem ao inverso da unidade de  $ITAE_i$  (Equação 8) e  $RMS_i$  (Equação 9), respectivamente. Além disso, foi também realizada uma extensão dos métodos M3 e M6 para este novo cenário (M7 e M8). O problema servo foi simulado com as perturbações nos *setpoints* no instante 10, levando-os aos valores de referência 0,5, 0,3 e 0,1 para Y1, Y2 e Y3, nesta sequência, e o problema regulador, através de simulação análoga ao sistema SISO.

$$ITAE_g = \sum_{i=1}^3 \beta_i ITAE_i \quad (8)$$

$$RMS_g = \sum_{i=1}^3 \gamma_i RMS_i \quad (9)$$

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fixado  $R_1=1$  como valor que compõe a Supressão de Movimento do problema de controle monovariável, calculada a partir da Equação 5, foi simulada a implementação do sistema de controle do trocador de calor, conforme os resultados resumidos na Tabela 2 para o problema servo (colunas “Sv”) e regulador (colunas “Rg”). Ademais, utilizou-se um

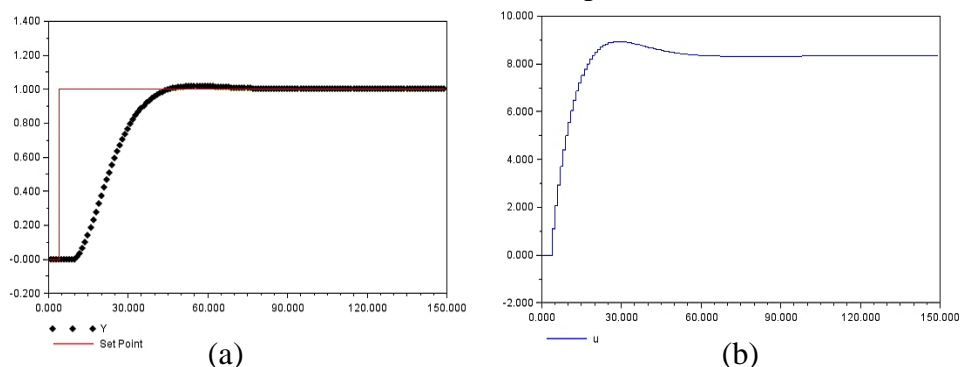
algoritmo de evolução diferencial de maneira a obter o melhor par Hp/Hc que minimiza ITAE da variável controlada do problema servo (linha “MO”). O tempo de simulação foi de 150 instantes de amostragem.

Tabela 2 – Resultados do problema servo e regulador para o sistema SISO.

Método	Par	ITAE		ITAE		RMS		RMS	
Hp/Hc	Hp/Hc	Sv-Y	Rg-Y	Sv-u	Rg-u	Sv-Y	Rg-Y	Sv-u	Rg-u
M1/M1	57/23	384,10	44,33	1076,70	186,03	0,33	0,08	1,82	0,18
M2/M2	51/15	378,71	44,24	953,38	178,83	0,33	0,08	1,83	0,19
<b>M3/M3</b>	<b>55/10</b>	<b>357,72</b>	<b>42,76</b>	<b>918,66</b>	<b>173,76</b>	<b>0,32</b>	<b>0,08</b>	<b>1,77</b>	<b>0,19</b>
M4/M4	52/12	369,03	43,38	979,05	178,21	0,33	0,08	1,79	0,19
M5/M1	32/23	386,55	44,65	1113,35	189,61	0,33	0,08	1,83	0,18
M5/M2	32/15	384,05	44,52	1101,17	188,81	0,33	0,08	1,82	0,19
M5/M3	32/10	372,21	44,01	1053,21	186,17	0,33	0,08	1,80	0,19
M5/M4	32/12	377,77	44,30	1074,06	187,53	0,40	0,08	2,22	0,19
M6/M1	28/23	393,89	45,08	1157,43	192,93	0,33	0,08	1,84	0,18
M6/M2	20/15	466,81	47,70	1437,55	205,60	0,34	0,08	1,96	0,16
M6/M3	15/10	673,39	51,52	2099,76	218,67	0,38	0,08	2,27	0,13
M6/M4	17/12	554,82	49,59	1707,89	211,22	0,36	0,08	2,10	0,14
<b>MO</b>	<b>43/5</b>	<b>308,44</b>	<b>48,84</b>	<b>775,88</b>	<b>260,35</b>	<b>0,31</b>	<b>0,02</b>	<b>1,68</b>	<b>0,15</b>

De acordo com a Tabela 2, a melhor combinação dos parâmetros de sintonia (Hp e Hc) para os problemas servo e regulador foi ensejada pelo método M3 de Hinde Jr e Cooper (1994), em que os índices de desempenho (ITAE e RMS) avaliados para as controladas e manipuladas alcançaram os menores valores entre os métodos investigados, passando 15,98% e 18,40% em relação ao ITAE de “Y” e “u”, respectivamente, da melhor combinação de parâmetros do problema servo (par 43/5). Porém, quando aplicado ao problema regulador, o par de MO não suscitou uma melhor sintonia quando comparado ao M3. O resultado gráfico do controle servo com a seleção desses parâmetros da estratégia M3 é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Resultado da simulação com Hp e Hc obtidos por M3 do cenário SISO para as variáveis controladas (a) e manipuladas (b).



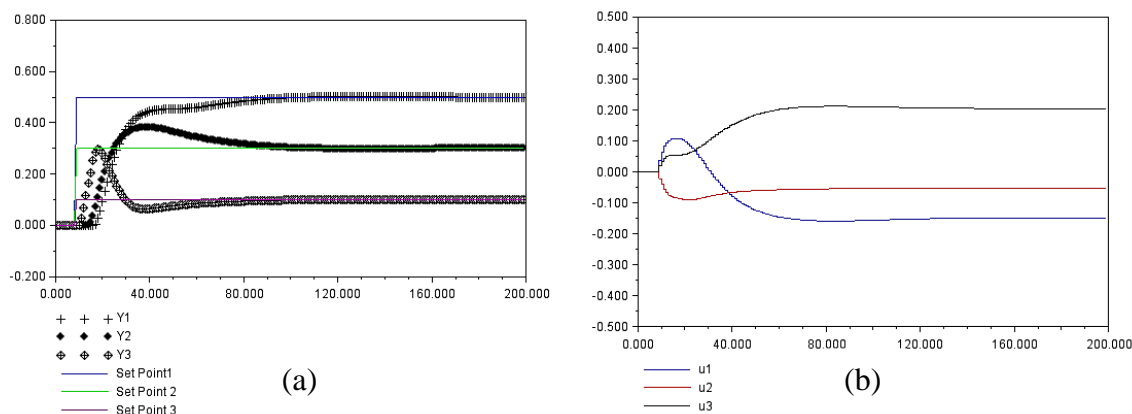
De forma análoga ao sistema multivariável, mediante a Equação 5, foram fixados  $R_1=96$ ,  $R_2=82$  e  $R_3=269$  como os elementos que compõem a diagonal da Matriz dos Pesos nas Manipuladas e foi simulado a implementação do controle da coluna de destilação com tempo de simulação de 200 instantes de amostragem. A síntese dos resultados é apresentada na Tabela 3 como solução dos dois problemas típicos de controle avaliados.

O método M7 (extensão proposta de M3) foi proficiente para o sistema de controle MIMO aplicado aos problemas servo e regulador, proporcionando as melhores medidas quantitativas de desempenho, próximas da combinação encontrada pelo algoritmo de otimização engendrado para o problema servo. O resultado na forma gráfica do controle servo com o par de parâmetros obtidos por M7 é apresentado na Figura 2.

Tabela 3 - Resultados do problema servo e regulador para o sistema MIMO.

Método	Par	ITAEg		ITAEg		RMSg		RMSg	
		Sv-Y	Rg-Y	Sv-u	Rg-u	Sv-Y	Rg-Y	Sv-u	Rg-u
M1/M1	72/29	662,13	439,29	496,13	188,12	0,24	0,23	0,19	0,05
M2/M2	65/20	648,27	441,50	497,67	190,53	0,24	0,23	0,19	0,05
<b>M7/M7</b>	<b>82/15</b>	<b>597,62</b>	<b>434,16</b>	<b>390,22</b>	<b>175,96</b>	<b>0,24</b>	<b>0,23</b>	<b>0,17</b>	<b>0,05</b>
M4/M4	81/21	628,13	436,92	430,89	179,71	0,24	0,23	0,17	0,05
M5/M1	40/29	911,72	443,48	818,87	197,99	0,24	0,23	0,21	0,05
M5/M2	40/20	904,02	442,69	809,53	197,45	0,24	0,23	0,21	0,05
M5/M7	40/15	909,84	441,37	815,85	196,23	0,24	0,23	0,21	0,05
M5/M4	40/21	904,02	442,86	809,53	197,63	0,24	0,23	0,21	0,05
M8/M1	29/29	1336,67	444,09	1399,57	181,56	0,25	0,23	0,24	0,05
M8/M2	20/20	1678,28	440,55	1786,55	162,76	0,25	0,23	0,26	0,04
M8/M7	15/15	1459,91	438,70	1639,08	175,66	0,26	0,22	0,27	0,04
M8/M4	21/21	1667,96	441,19	1772,32	164,17	0,25	0,23	0,26	0,04
<b>MO</b>	<b>82/11</b>	<b>581,15</b>	<b>210,15</b>	<b>367,45</b>	<b>92,02</b>	<b>0,24</b>	<b>0,11</b>	<b>0,17</b>	<b>0,03</b>

Figura 2 – Resultado da simulação com Hp e Hc obtidos por M7 do cenário MIMO para as variáveis controladas (a) e manipuladas (b).



Conforme esperado, verificou-se, segundo a Tabela 2, que as extraviadas sintonias do controlador foram aquelas obtidas da combinação com M6, resvalando os maiores dispêndios em termos de desempenho para o problema regulador e, em especial, para o problema servo (os erros de “u” e “Y” que ocorreram mais tarde na resposta foram os mais acentuados). Por outro lado, entre as diretrizes estudadas ao cenário MIMO, a combinação de M8 (adaptado de M6, ambos aplicados no limite da igualdade) com M2, M4 ou M7 se mostrou vantajoso apenas para o problema regulador. Em relação às medidas de desempenho, notou-se que nos dois cenários o RMS não conduziu a uma definitiva seletividade (valores muito próximos) para os métodos avaliados, sendo o ITAE o critério diferenciador nesse estudo.

## 4. CONCLUSÃO

Entre as diretrizes de sintonia contempladas neste trabalho, o M3 de Hinde Jr e Cooper (1994) para um sistema SISO e a proposta de estender este método para um sistema MIMO (M7) amoldaram os melhores índices de desempenho - ITAE e RMS (critério com baixa seletividade) - desvelados a um problema servo e regulador.

Conforme esperado, as combinações das estratégias com M6 e com M8, por serem definidas mediante bandas de valores não garantiram uma sintonia eficaz ao cenário proposto, o que representa, amiúde, resultados indesejáveis com índices de desempenho elevados. Contudo, o método M8 coadunado com M2, M4 ou M7 se apresentou profícuo somente quando aplicado a um problema regulador.

Para avaliar outras combinações possíveis de ajustes que podem matizar melhores efeitos no desempenho e robustez do controlador, sugere-se, como trabalho vindouro, o estudo de métodos de sintonia para o peso nas variáveis controladas e manipuladas (tanto para modelos de convolução quanto para modelos em espaço de estados), em consonância com as sintonias investigadas neste trabalho, seja feito inclusive para sistemas não quadrados.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFU e ao CNPQ pelo apoio concedido.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. Model Predictive Control. 2. ed. Sevilla: Springer, 1999.
- CAMPOS, M. C. M. M. D.; GOMES, M. V. D. C.; PEREZ, J. M. G. T. Controle Avançado e Otimização na Indústria do Petróleo. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.
- GEORGIU, A.; GEORGAKIS, C.; LUYBEN, W. L. Nonlinear Dynamic Matrix Control for High-Purity Distillation Columns. *AIChE Journal*, v. 34, n. 8, p. 1287-1298, 1988.
- HINDE JR, R. F.; COOPER, D. J. A pattern-based approach to excitation diagnostics for adaptive process control. *Chemical Engineering Science*, v. 49, n. 9, p. 1403-1415, 1994.
- MAURATH, P. R. et al. Predictive controller design by principal components analysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 27, n. 7, p. 1204-1212, 1988.
- MAURATH, P. R.; MELLICHAMP, D. A.; SEBORG, D. E. Predictive controller design for single-input/single-output (SISO) systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 27, n. 6, p. 956-963, 1988.
- SHRIDHAR, R.; COOPER, D. J. A tuning strategy for unconstrained multivariable model predictive control. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 37, n. 10, p. 4003-4016, 1998.