

AValiação DE ESTRATÉGIAS DE SINTONIAS DO DMC

H. C. OYAMA¹, L. C. OLIVEIRA-LOPES¹

¹ 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 (Hp); Horizonte de Controle (Hc); 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.

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

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

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

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

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

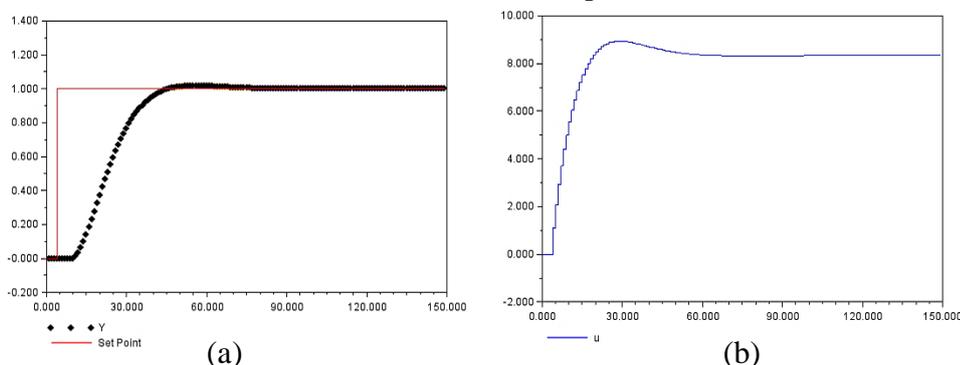
algoritmo de evolução diferencial de maneira a obter o melhor par Hp/Hc que minimiza ITAE da variável controlada do problema servo (linha “MO”). O tempo de simulação foi de 150 instantes de amostragem.

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

Método	Par	ITAE		ITAE		RMS		RMS	
		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
M3/M3	55/10	357,72	42,76	918,66	173,76	0,32	0,08	1,77	0,19
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
MO	43/5	308,44	48,84	775,88	260,35	0,31	0,02	1,68	0,15

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).



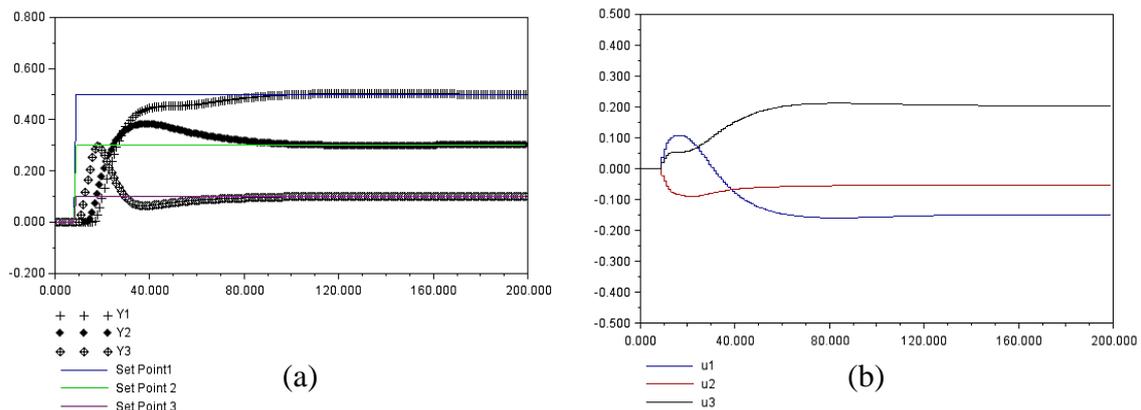
De forma análoga ao sistema multivariável, mediante a Equação 5, foram fixados $R_1=96$, $R_2=82$ e $R_3=269$ como os elementos que compõem a diagonal da Matriz dos Pesos nas Manipuladas e foi simulado a implementação do controle da coluna de destilação com tempo de simulação de 200 instantes de amostragem. 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
M7/M7	82/15	597,62	434,16	390,22	175,96	0,24	0,23	0,17	0,05
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
MO	82/11	581,15	210,15	367,45	92,02	0,24	0,11	0,17	0,03

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. Sevilha: 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.