

CONTROLE POR MATRIZ DINÂMICA EM MALHAS DE DUAL COMPOSIÇÃO EM COLUNAS DE DESTILAÇÃO

S. FERNANDES¹, C. B. CAVALCANTE¹, B. V. de SOUSA¹, H. BISPO¹ e J. N. SILVA¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química
E-mail para contato: nilton@deq.ufcg.edu.br

RESUMO – O controle simultâneo de composições de topo e de fundo numa coluna de destilação é um problema complexo devido ao acoplamento inerente desses dois tipos de variáveis, restringindo o uso de técnicas convencionais. Esse trabalho visa implementar o algoritmo *DMC* em plataforma *VBA* integrado com *Aspen Dynamics*®. Nesse estudo foi realizado o controle das composições de topo e de fundo de uma coluna de fracionamento de Benzeno e Tolueno, atuando na razão de refluxo e vapor/base, onde os demais parâmetros são: carga, temperatura e pressão da coluna. Os resultados mostraram que o controlador *DMC* apresentou melhor desempenho para o controle de dual composição quando comparado ao sistema equivalente utilizando controlador *PID*.

1. INTRODUÇÃO

A existência de um grande número de artigos publicados a respeito de vários aspectos do controle de colunas de destilação é uma evidência da importância que a comunidade acadêmica e industrial dá a este problema. As necessidades atuais de minimização de custos com redução do consumo de matérias primas e energia requerem, não apenas o controle de uma composição, mas o controle multivariável de colunas.

São vários os problemas enfrentados pela indústria sobre a implementação do controle dual de composição numa coluna de destilação. De acordo com Skogestad e Morari (1987), o principal problema é a estabilidade quando se sintoniza os controladores com a finalidade de se obter uma resposta rápida. Outros fatores são também importantes, dos quais diz respeito ao comportamento altamente não linear, resposta muito lenta, problema de medição (tempos mortos para analisadores), e dificuldade na escolha de variáveis manipuladas.

Um aspecto muito importante no controle de colunas de destilação é a síntese de estrutura de controle. Takamatsu et al. (1988) propõem a escolha criteriosa das variáveis manipuladas, segundo uma abordagem geométrica, para reduzir a interação entre as malhas com controladores monovariáveis. Skogestad e Morari (1987) recomendam a vazão de refluxo e a relação entre as vazões de saída do refeedor e do produto de fundo para controle multivariável das composições de topo e de fundo. A escolha destas variáveis torna o controle mais eficiente no caso regulatório.

Este trabalho visa o estudo e implementação em plataforma *VBA* do algoritmo de controle por matriz dinâmica, conhecida por *DMC* (*Dynamics Matrix Control*), para

implementação de estratégias de controle em processos simulados na plataforma *Aspen Dynamic*®. Para avaliação da ferramenta, foi utilizada uma coluna de destilação de fracionamento de benzeno e tolueno.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Controle preditivo baseado em modelo

O MPC – (*Model Predictive Control*) diz respeito a uma ampla faixa de métodos de controle que faz uso explícito de um modelo do processo para obter um sinal de controle por minimização de uma função objetivo, onde várias aplicações são citadas na literatura (Stewart et al. 2010; Scattolini, 2009; AlGhazzawi e Lennox, 2009; Daraoui et al., 2010). Sua aplicação deve-se principalmente ao fato de que tais classes de controladores podem atuar eficientemente em processos multivariáveis, com restrições nas suas variáveis.

A estratégia de controle baseado em modelo tem como base as informações passadas de entrada $u(t)$ e de saída $y(t)$ e numa projeção para as ações futuras de controle, como mostra a Figura 1.a. A saída de um modelo interno, que representa o processo, é predita ao longo de um horizonte de tempos de amostragem H_p (horizonte de predição). Uma sequência de *setpoints* futuros é gerada, w (trajetória funcional de referência). Uma função objetivo apropriada de erros futuros e ações de controle é minimizada para fornecer uma sequência de ações de controle futura, onde estas ações podem variar dentro do horizonte de controle $H_c \leq H_p$, mostrada na Figura 1.b.

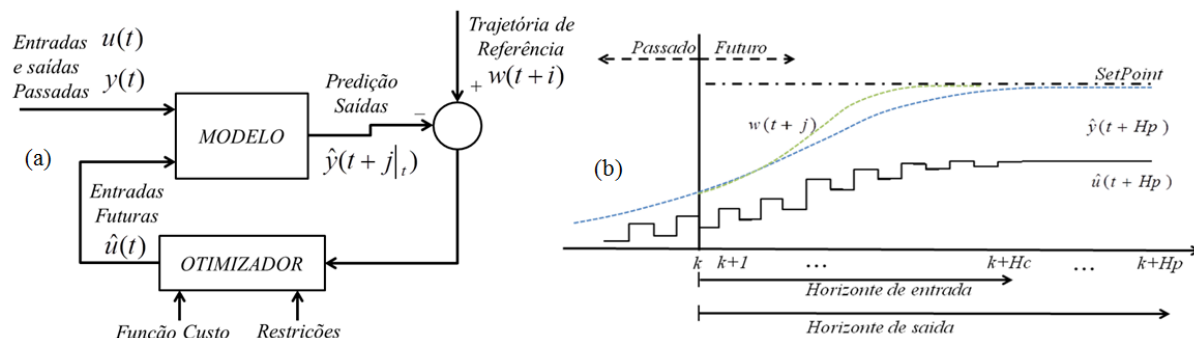


Figura 1 – (a) Estrutura básica de um MPC, (b) Comportamento típico de um MPC (Fonte adaptada (Camacho e Bordons,1999))

Apenas a primeira ação de controle calculada é implementada no processo real, para a qual as variáveis controladas são medidas. No próximo tempo de amostragem, o mesmo problema de otimização é resolvido com a nova condição inicial obtida mediante informações tiradas da planta neste último instante, com o horizonte de predição movido adiante por um tempo de amostragem. Sendo assim, a técnica ficou conhecida como de horizonte móvel (*moving horizon* ou *receding horizon control*).

2.2 Controle por Matriz Dinâmica (DMC)

O objetivo do algoritmo *DMC*, de acordo com Camacho e Bordons (1999), é calcular as ações de controle, representadas por incremento nas variáveis manipuladas, através da minimização do critério descrito na equação seguinte:

$$J = \sum_{j=1}^{N_y} \lambda_y [(\hat{y}(t+j|_t) - w(t+j))]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda_u [(\Delta u(t+j|_t) - 1)]^2 \quad (1)$$

onde N_y é o horizonte de previsão da saída, N_u é o horizonte de controle, sendo $N_u \leq N_y$, λ_y e λ_u são as ponderações nos sinais de saída e de controle, $\hat{y}(t+j|_t)$ é a previsão da saída no instante $t+j$ utilizando as informações disponíveis até o instante t , $w(t)$ é a referência no instante t e $\Delta u(t)$ é o incremento do sinal de controle no instante t .

Para que o problema de otimização possa ser resolvido, é necessário que se tenha um modelo do processo para calcular as previsões da saída. Um dos modelos usados no algoritmo DMC é o modelo de resposta ao degrau de acordo com a Equação 2.

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) + p(t) \quad (2)$$

onde $\Delta u(t)$ e $y(t)$ são, respectivamente, o incremento da entrada e a saída do sistema no instante discreto de tempo t , g_i é o ganho da resposta ao degrau no i -ésimo instante de tempo a partir da aplicação do degrau e $p(t)$ é a perturbação atuando no processo.

Do incremento da entrada $\Delta u(t)$, como mostrado na Figura 2, o vetor ganho pode ser obtido a partir da Equação 3, onde a mesma pode ser representada pela Equação 4, podendo ser generalizada para sistemas multivariáveis.

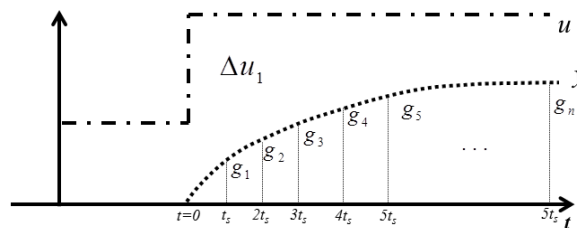


Figura 2 – Resposta $y(t)$ ao degrau $\Delta u(t)$

$$\sum_{i=1}^n g_i = \sum_{i=1}^n \frac{y(t_i)}{\Delta u(t_i)} \quad (3)$$

$$\mathbf{g} = (g_1, g_2, g_3, \dots, g_n) \quad (4)$$

Os valores previstos da saída para instantes futuros de tempo (Camacho e Bordons, 1995) são dados por:

$$\hat{y}(t+l|_t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t+l-i) + \hat{p}(t+l|_t) \quad (5)$$

Pode-se reescrever a equação de previsão, separando-se os termos referentes às contribuições do passado e futuro, conforme descrito a seguir:

$$\hat{y}(t+l|_t) = \sum_{i=l+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+l-i) + \sum_{i=1}^l g_i \Delta u(t+l-i) + \hat{p}(t+l|_t) \quad (6)$$

onde $\sum_{i=l+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+l-i)$, refere-se a contribuição para a saída y devido aos incrementos passados na variável u e $\sum_{i=1}^l g_i \Delta u(t+l-i)$ corresponde a contribuição para y devido os

incrementos futuros na variável u e $\hat{p}(t+l|_t)$, as perturbações atuando no processo, consideradas constantes para os instantes superiores a t .

Uma vez que $\hat{p}(t+l|_t)$ é assumido constante para os instantes superiores a t , pode ser definido por: $\hat{p}(t+l|_t) = \hat{p}(t|_t) = y(t) - \hat{y}(t|_t)$, sendo $\hat{y}(t|_t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i)$, resultando então em:

$$\hat{p}(t+l|_t) = y(t) - \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \quad (7)$$

Substituindo a Equação 7 na Equação 6, resulta na Equação 8, onde um termo $f(t+l)$ que representa a resposta livre do sistema, ou seja, a parte da resposta que não depende das futuras ações de controle, pode ser assumido. Dessa forma o modelo de previsão pode ser escrito de acordo com a equação 9.

$$\hat{y}(t+l|_t) = \sum_{i=1}^l g_i \Delta u(t+l-i) + f(t+l) \quad (8)$$

onde $f(t+l) = y(t) - \sum_{i=1}^{\infty} (g_{i+l} - g_i) \Delta u(t-i)$.

Para processos assintoticamente estáveis, os coeficientes g_i da resposta ao degrau tendem a ser constante após um valor N (Camacho e Bordons, 1999). Neste caso, pode-se considerar que $g_{i+l} - g_i \cong 0$ para $i > N$. Considerando que $i = 1, \dots, N_y$ e que $\Delta u(t+i) = 0$, $i > N_u$, na forma vetorial:

$$\hat{y}' = G \Delta u + f' \quad (9)$$

onde $G_{n_y \times n_y - n_u + 1}$ é a matriz dinâmica, \hat{y}' é o vetor predição, f' é o vetor resposta livre dos sistema e Δu é o vetor estímulo do controlador determinado pela resolução da função custo J .

Uma vez estabelecido à forma estendida do modelo de predição, que pode ser obtida a partir de um estímulo no processo, substituindo a Equação 9 e o modelo de referência w , a função custo, Equação 1, pode ser reescrita, resultando na Equação 10.

$$J = \lambda_y (G \Delta u + f' - w')^T (G \Delta u + f' - w') + \lambda_u \Delta u^T \Delta u \quad (10)$$

A condição de otimização consistem em fazer a derivada da Equação 10 com relação ao vetor estímulo Δu igual a zero, isolar o termo Δu , que corresponde à lei de controle ótima para o DMC, como mostra a Equação 11.

$$\Delta u = (\lambda_y G^T G + \lambda_u I)^{-1} \lambda_y G^T (w' - f') \quad (11)$$

Da estratégia Receding horizon, em cada instante t calcula-se a lei de controle e aplica-se somente o primeiro elemento no processo, onde coincide com a lei de controle posicional.

3. METODOLOGIA

3.1 Algoritmo DMC para a plataforma VBA

O algoritmo de controle DMC foi implementado em plataforma VBA, e sua forma matricial representada pela Equação 11, assim também, como todas as etapas de especificação das variáveis controladas, manipuladas e distúrbios, dos modelos e configuração do controlador DMC, de acordo como detalhado no fluxograma apresentado na Figura 3. A partir da planta implementada na plataforma *Aspen Dynamics*®, a conexão com VBA foi realizada utilizando a tecnologia de comunicação *Object Linking and Embedding* (OLE).

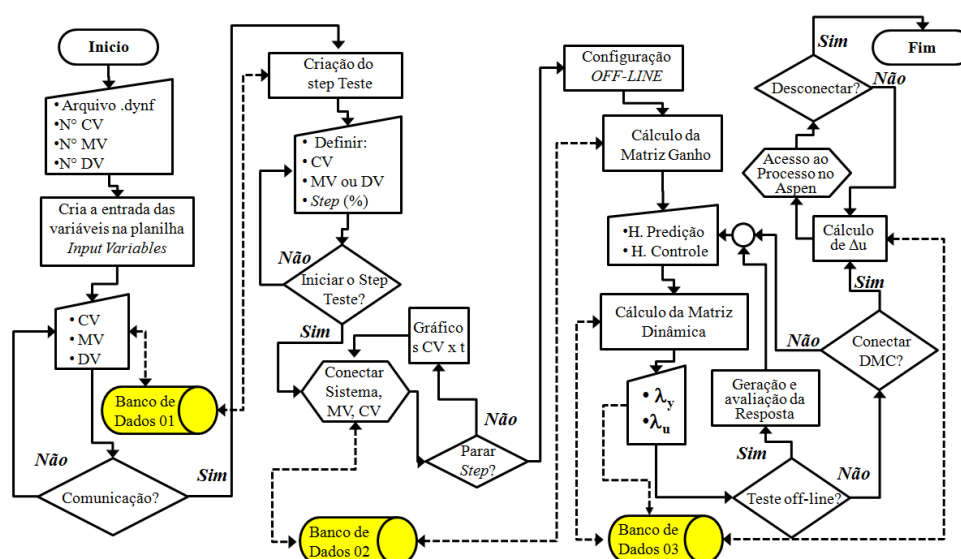


Figura 3 – Algoritmo simplificado do programa do sistema DMC desenvolvido no VBA

3.2 Coluna BT

Para avaliar a implementação do algoritmo clássico do DMC na plataforma VBA, uma coluna de destilação simples de fracionamento de benzeno e tolueno foi utilizada no presente trabalho, sendo a mesma modelada na plataforma *Aspen Dynamics*®, como mostrado no diagrama simplificado na Figura 4.

A coluna adotada para o estudo é constituída por 14 estágios, com uma carga de alimentação média de $29,303 \text{ th}^{-1}$, composta de uma fração mássica de 0,56 de benzeno e 0,44 de tolueno. A finalidade desta coluna é concentrar benzeno a 99,6 % em massa na corrente de produto de topo, a S104. A corrente do produto de base, identificada como S106, sendo composta de 93,9 % de tolueno. O controlador DMC proposto tem como variáveis controladas as composições de benzeno no topo e tolueno na base, atuando nas razões de refluxo LRD e de vazão de vapor LFvB.

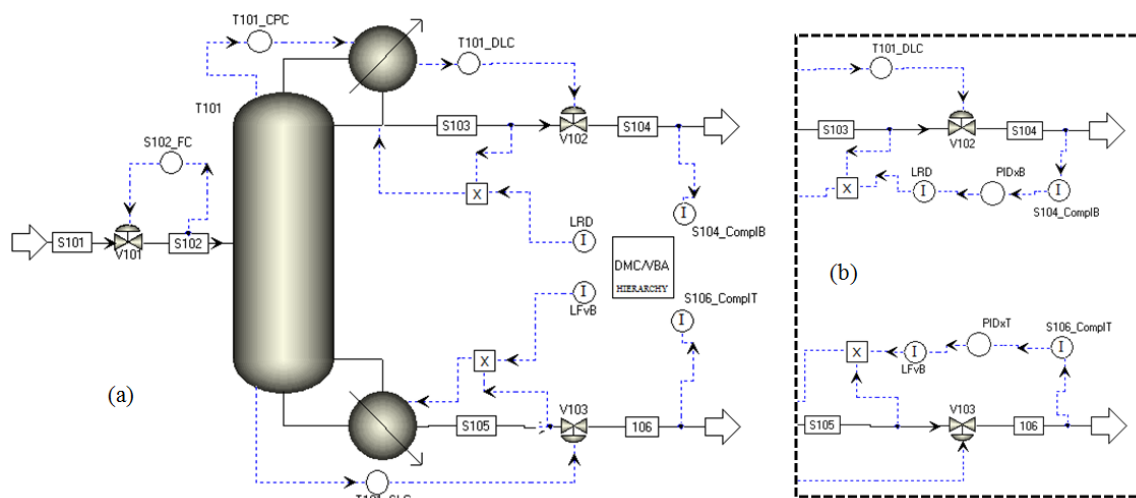


Figura 4 – Coluna de destilação e suas malhas de controle: (a) DMC, (b) PID.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Interface da ferramenta DMC

A interface da ferramenta *DMC* foi desenvolvida na linguagem orientada a eventos de forma a facilitar as etapas de estruturação do controlador integrado com qualquer simulação implementada na plataforma Aspen Dynamic®.

Na Figura 5 estão apresentadas as duas etapas. A primeira consiste na especificação do caminho do arquivo de simulação assim como o número de variáveis controladas, manipuladas e distúrbios medidos. A segunda etapa, a verificação da conexão da variável.

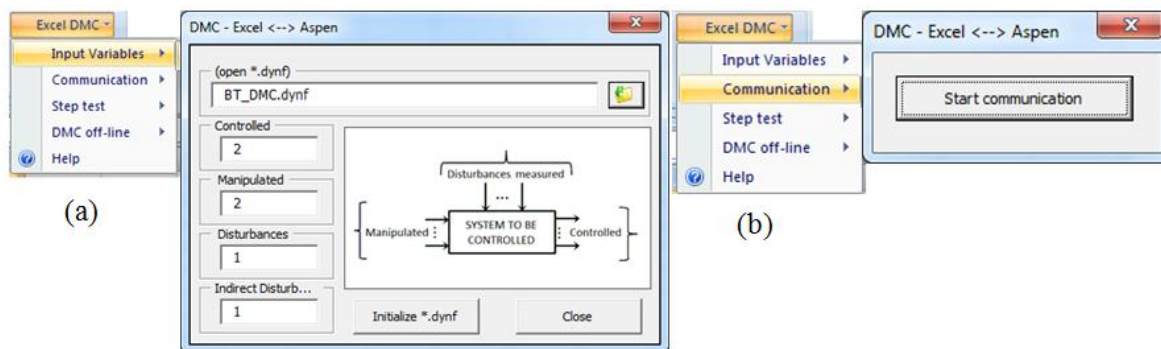


Figura 5 – Interface de configuração inicial do *DMC*: (a) definição do arquivo e definição das variáveis (b) verificação da conexão das variáveis entre o *VBA* e o *Aspen Dynamic*®

A etapa seguinte, muito importante para a configuração do controlador do *DMC* são as definições dos modelos. Na Figura 6.a, apresenta-se o exemplo de especificação do modelo degrau para a composição de benzeno no topo com o degrau aplicado na razão de refluxo. Ainda na mesma Figura 6.b, as demais etapas para especificação do controlador.

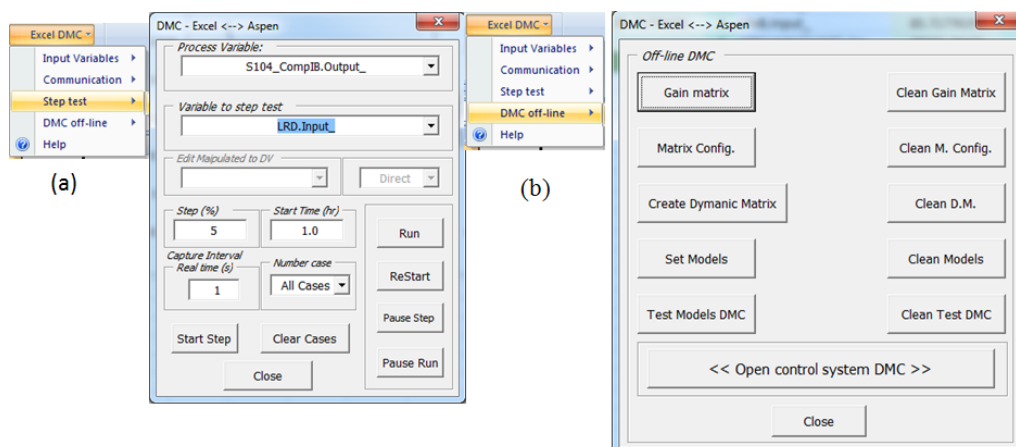


Figura 6 – Interface de configuração dos modelos: (a) Especificação do *Step test* (b) criação da matriz dinâmica e testes *off-line*

Após testes *off-line* do controlador DMC, controlador DMC *on-line* pode ser utilizado com o Aspen Dynamic®, como mostra a Figura 7.

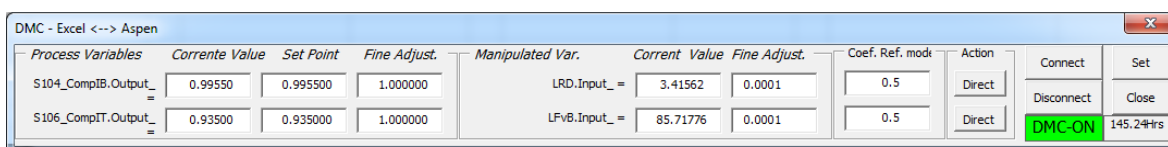


Figura 7 – Interface do controlador DMC *on-line* com Aspen Dynamic®

4.2 Aplicação da Ferramenta PID em VBA

Para avaliação do desempenho do sistema de controle em estudo utilizando o DMC e controladores PIDs, como mostrado na Figura 4, foram utilizadas perturbações percentuais de 5% na carga de alimentação da coluna e nos *set points* das composições em questão. Na Figura 8 estão apresentados os resultados referente a utilização o controlador DMC, enquanto na Figura 9, estão apresentados para as mesmas perturbações o controlador PID.

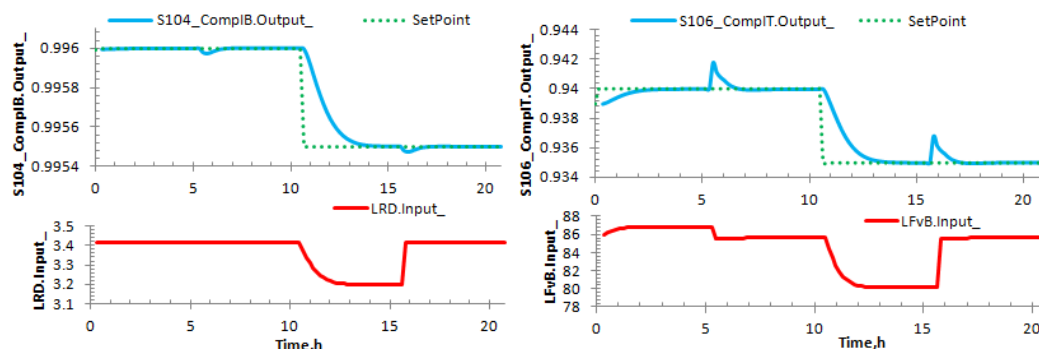


Figura 8 – Comportamento das composições utilizando DMC

Pelos resultados gráficos, percebe-se que o controlador DMC teve melhor desempenho quando comparado com o controlador PID em estruturas equivalentes. Utilizando o índice de desempenho ITAE, como mostra os valores na Tabela 1, tal comportamento é comprovado.

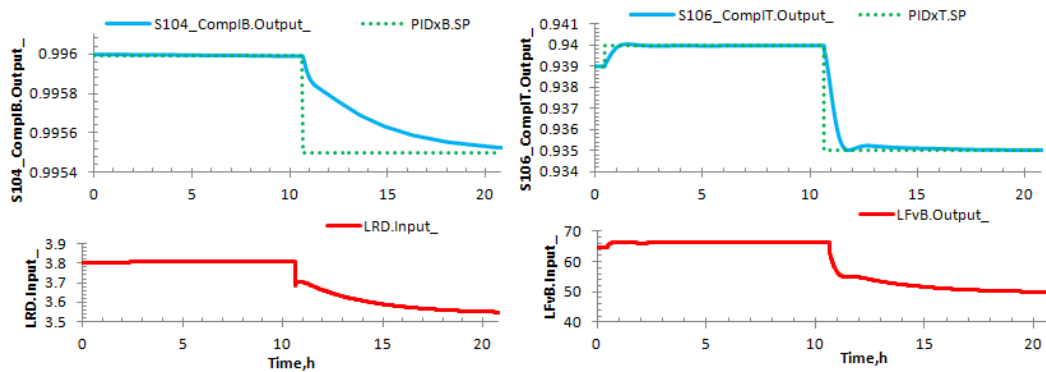


Figura 10 – Comportamento das composições utilizando controladores PID

Tabela 1 – Análise do desempenho das malhas de controle

Malha de controle	ITAE (<i>Integrated of the Time multiplied by Absolute Error</i>)	
	Comp. de Benzeno no Topo	Comp. de Tolueno na Base
DMC	0,2122	0,6127
PID	1.9637	3,3719

5. CONCLUSÃO

O controlador *DMC* desenvolvido em plataforma *VBA* possibilitou implementar a integração com modelos de plantas disponíveis na plataforma *Aspen Dynamics®*. No estudo de caso, o melhor desempenho obtido foi com o controlador *DMC*. Tal ferramenta pode ser utilizada em aplicações práticas para o ensino de controle de processos, uma vez que apresentam em detalhes as etapas de configuração dessa classe de controlador.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao FNDE/UFCEG/DEQ/PET.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGHAZZAWI, A., LENNOX, B. – Model predictive control monitoring using multivariate statistics. *Journal of Process Control* 19, 314–327, 2009.
- CAMACHO, E.F. and C. BORDONS, *Model Predictive Control*, Springer, London (1999).
- DARAOUI, N., DUFOUR, P., HAMMOURI, H., HOTTOT, A. - Model predictive control during the primary drying stage of Isophilisation. *Control Engineering Practice*. 18,2010.
- SCATTOLINI, R. - Architectures for distributed and hierarchical Model Predictive Control – A review. *Journal of Process Control*.19, 723–731, 2009.
- STEWART, B. T., VENKAT, A. N., RAWLINGS, J. B., WRIGHT, S. J., PANNOCCHIA, G. - Cooperative distributed model predictive control. *Sys. & Control* 59, 460_469, 2010.
- SKOGESTAD, S., MORARI, M. Control configuration selection for distillation columns. *AICHE J.*, p. 1620-1635, 1987.
- TAKAMATSU, T., HASHIMOTO, I., HASHIMOTO, Y. Selection of manipulated variables to minimize interaction in multivariable control of a distillation column, *Int. Chem. Eng.*, 27(4), 1988.