



# AJUSTE DE CONTROLADORES PREDITIVOS BASEADO NO ESTUDO DE CENÁRIOS OPERACIONAIS

Luciano A. Farina<sup>1</sup>, Jorge O. Trierweiller<sup>2</sup>, Herbert Teixeira<sup>3</sup>

1 -TriSolutions Soluções em Engenharia Ltda – Rua Gen. Bento Martins, 24/1101 –CEP: 90080-010 – Porto Alegre – RS – Brasil - Telefone: (51) 3227 8514 – Fax: (051)3212 3937 – Email: farina@trisolutions.com.br

2 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento Engenharia Química – Rua Marechal Floriano, 501, CEP: 90020-061 – Porto Alegre – RS – Brasil – Telefone (51) 3216-4072 – E-mail : jorge@enq.ufrgs.br

3 -CENPES – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello

**RESUMO** – A aplicação de controladores multivariáveis preditivos tem sido freqüente em processos químicos e petroquímicos. Algumas das dificuldades encontradas na aplicação deste tipo de sistema são a sintonia dos parâmetros e a possível modificação de dinâmicas do sistema quando se perdem graus de liberdade por saturação de uma ou mais variáveis. Este artigo apresenta uma metodologia para o ajuste de controladores preditivos baseada na metodologia RPN de análise da controlabilidade. Apresenta-se ainda um procedimento de busca de cenários problemáticos em sistemas multivariáveis e possibilidades para contornar estes problemas. As ferramentas foram testadas em um sistema multivariável denominado ‘unidade de quatro tanques’, sendo apresentados e discutidos os principais resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** controladores preditivos, cenários operacionais, metodologia RPN

**ABSTRACT** – Model Predictive Control are being more and more used, specially in the chemical and petrochemical industry. Some difficulties in this field are the parameters tuning and the possibility of changes in the system dynamics when the process loss degrees of freedom by the variables saturation. This work presents a systematic methodology to tune MPC controllers, based on RPN methodology. Its also shown a procedure to search problematic operating points in multivariable systems and some possibilities to solve the problem. The tools were applied to the quadruple-tank plant.

**KEYWORDS:** predictive controllers, operation points, RPN methodology

## 1.INTRODUÇÃO

Um grande número de indústrias químicas e petroquímicas utiliza hoje, na operação de suas unidades, das técnicas de controle preditivo multivariável (*Multivariable Predictive Controller* - MPC). Os controladores MPC baseiam-se na tomada de ações de controle calculadas através de um processo de otimização onde a função objetivo leva em conta o erro nas variáveis controladas e a

variação nas manipuladas, ambas com base em um modelo do processo em questão. Algumas das principais vantagens deste método de controle são o seu princípio de funcionamento naturalmente multivariável e a possibilidade de se levar em conta diretamente as restrições do processo. Estas vantagens são especialmente importantes em processos onde as variáveis apresentam elevado grau de acoplamento.



Um caso interessante de controle ocorre quando um processo com um determinado número de graus de liberdade muda de ponto de operação de tal modo que na nova condição ocorre a saturação de uma ou mais variáveis manipuladas, ou seja, ocorre perda de graus de liberdade. Quando, em um controlador multivariável com o mesmo número de variáveis manipuladas e controladas, ocorre a saturação de alguma variável de atuação, obrigatoriamente deve ocorrer a liberação de uma variável de controle para que a solução do problema de otimização seja viável, sendo que o novo problema de controle pode ser encarado como um subsistema do original. O fato interessante é que estes subsistemas podem apresentar comportamentos dinâmicos característicos, devidos ao grau de acoplamento, surgimento de zeros de transmissão no semiplano direito e problemas de condicionamento, entre outros. Estes comportamentos, por sua vez, são características do processo, podendo ser identificados a partir da adequada análise do modelo disponível nos controladores MPC. Caso estes comportamentos não sejam considerados, determinadas situações operacionais podem levar o controlador MPC à instabilização do processo.

Através da utilização das ferramentas que compõem a metodologia RPN de estudo da controlabilidade de processos e de um método de busca de cenários onde determinadas condições consideradas problemáticas são detectadas, é possível configurar adequadamente as faixas operacionais de um processo e ajustar o controlador MPC para que este opere de forma adequada.

A metodologia RPN consiste de uma série de procedimentos de análise e projeto que permite a seleção de estruturas de controle baseada na avaliação da controlabilidade do processo malhas (Farina, 2000).

Este trabalho apresenta uma metodologia de ajuste para controladores MPC e um procedimento para reconhecimento e estudo dos possíveis cenários críticos com características específicas.

Para ilustrar o funcionamento das metodologias propostas, estas são aplicadas a uma planta laboratorial de 4 tanques acoplados.

## 2.METODOLOGIA DE AJUSTE

Dentre as etapas que mais consomem tempo na implantação do controle avançado utilizando controladores MPC tem-se a sintonia dos parâmetros. Assim, com base na metodologia RPN, foi desenvolvida uma técnica de seleção de parâmetros que permite ao engenheiro de controle a obtenção dos parâmetros de uma forma rápida e prática (Trierweiler e Farina, 2003).

A metodologia RPN permite que se faça uma comparação sistemática entre o desempenho desejado e o alcançável decorrente de fatores que limitam o desempenho, tais como: resposta inversa, pólos instáveis, tempo morto e saturação. Deste modo, é possível definir quanto se pode exigir de um processo por meio do fechamento de malhas (Farina, 2000).

Os vários algoritmos de MPC propõem funções-objetivo diferentes para a obtenção da lei de controle. Uma expressão bastante geral para a função objetivo é

$$J = \sum_{j=P_0}^P \|\hat{y}(t+j|t) - r(t+j)\|_Q^2 + \sum_{j=1}^M \|\Delta u(t+j-1)\|_W^2 \quad (1)$$



onde  $\hat{y}(t+j|t)$  é a saída predita  $j$  amostragens no futuro, baseada na informação disponível no tempo  $t$  para o modelo do sistema  $G(s)$ ,  $r(t+j)$  é o sinal de referência  $j$  amostragens no futuro,  $\Delta u(t) = (1-z^{-1})u(t) = u(t) - u(t-1)$ , e  $\|x\|_W^2$  são as normas Euclidianas normalizadas definidas como  $\|x\|_W^2 = x^T W x$ . Os parâmetros de ajuste são os horizontes de predição mínimo ( $P_0$ ) e máximo ( $P$ ), horizonte de controle ( $M$ ), tempo de amostragem ( $t_s$ ), peso da variável controlada ( $Q$ ) e da variável manipulada ( $W$ ), também denominado supressor ao movimento. Uma série de regras de ajuste para os parâmetros do controlador podem ser encontradas em uma série de referências, como Grimble (1992) e Santina et al. (1996). Infelizmente estas regras de engenharia normalmente não são suficientes para o ajuste do controlador, servindo apenas como uma estimativa, e não podem ser consideradas metodologias sistemáticas de ajuste.

Antes do ajuste do controlador propriamente dito, é necessário quantificar o quão difícil é o problema de controle. Para isso, calcula-se o índice RPN utilizando a performance alcançável, que é função do desempenho desejado para o sistema em malha fechada e dos parâmetros que limitam o desempenho do controlador, ou seja, os elementos de fase não mínima.

O RPN é a quantificação da dificuldade em se atingir o desempenho desejado em uma planta de forma robusta (Farina, 2000). Assim, o primeiro passo da estratégia de ajuste é a determinação do desempenho desejado em malha fechada, que pode ser escolhido com base na resposta do sistema em malha aberta. Um bom compromisso entre velocidade de mudança de *setpoint* e rejeição a distúrbios pode ser obtido com um razão entre as velocidades em malha fechada e aberta de

quatro. Com o desempenho desejado determina-se o desempenho alcançável a partir da fatoração do modelo do processo (Farina, 2000).

Pela metodologia RPN, é possível escalonar as entradas e saídas do sistema de modo que o condicionamento seja mínimo, assim não é necessário utilizar as matrizes de peso  $Q$  e  $W$  para este fim, deixando-as apenas para a sintonia do modo de atuação do controlador. A função objetivo de um controlador preditivo devidamente escalonado toma a forma a seguir

$$J = \sum_{j=P_0}^P \|\hat{y}(t+j|t) - r(t+j)\|_Q^2 + \sum_{j=1}^M \|\Delta u(t+j-1)\|_W^2 \quad (2)$$

onde  $\hat{y}_s(t+j|t)$  é a saída do sistema predito  $j$  passos no futuro baseado no modelo escalonado  $G_S(s)$ , i.e.,  $G_S(s) = L_S G(s) R_S$ .  $L_S$  e  $R_S$  são os vetores que escalonam as saídas e as entradas do sistema, respectivamente.

A determinação do tempo de amostragem  $t_s$  pode ser realizada com base no desempenho desejado.  $t_s$  fica definido como um quarto do tempo de subida do desempenho desejado.

Os horizontes de predição mínimo ( $P_0$ ) e máximo ( $P$ ), para processos estáveis, estão relacionados com dinâmica do sistema em malha aberta. O tempo de assentamento  $P$  deve ser igual ou menor ao tempo de assentamento em malha aberta, expresso em número de amostragens. Se o sinal de referência  $r$  está baseado no desempenho alcançável,  $P_0$  pode ser considerado zero. O horizonte de controle  $M$  fica definido como  $P/4$ .



Usualmente as matrizes de peso  $Q$  e  $W$  são matrizes diagonais, cujos parâmetros são sintonizados para se obter o desempenho desejado em malha fechada e escalonar as variáveis de entrada e saída, tornando as unidades de medida e as variáveis manipuladas compatíveis. O efeito destas variáveis na resposta do sistema em malha fechada são:

- $Q$ . O aumento no valor de um elemento da matriz faz que a respectiva variável controlada siga o valor base de forma mais agressiva.
- $W$ . O valor  $W$  penaliza as ações bruscas na variável manipulada. Quanto maior o valor de um dado elemento, mais brandas serão as ações de controle tomadas na variável manipulada correspondente.

A metodologia RPN sintoniza as matrizes de peso com base na direção dos fatores que limitam o desempenho do sistema com as equações a seguir.

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 + y_{z,s}}} \quad (3)$$

$$W = \sqrt{(1 + u_{z,s}) \log_{10}(RPN + 1)} \times \text{mean}\left(\left|g_s^{i,j}(\omega_{\text{sup}})\right|\right) \quad (4)$$

Neste caso,  $y_z$  e  $u_z$  são as direções de saída e entrada do zero de transmissão no semi-plano direito mais próximos à origem do sistema escalonado  $G_S(s)$ . As direções deste zero fornecem uma idéia de como seu efeito se distribui nas saídas e entradas. Objetiva-se, em linhas gerais, excitar o mínimo possível as entradas nas quais o zero se manifesta. A princípio, se for considerados  $y_z$  e  $u_z$  iguais à unidade, praticamente o mesmo resultado será verificado. Entretanto, deve-se utilizar estes valores apenas como um guia, pois o fator RPN já está incluso no cálculo de  $W$ , visando evitar ações de controle bruscas. Quanto maior o valor

de RPN, mais brandas serão as ações de controle tomadas. O fator  $\text{mean}\left(\left|g_s^{i,j}(\omega_{\text{sup}})\right|\right)$  é adicionado para tornar o segundo termo independente das matrizes de escalonamento  $L_S$  e  $R_S$ .

Ao fim, para aplicar as ações de controle na planta, as ações de controle escalonadas  $u_s$  devem ser rescalonadas para as unidades originais, isto é,  $u = R_S \cdot u_S$ . Para aplicar esta metodologia em um controlador MPC comercial que não possua a possibilidade de utilização direta das matrizes de escalonamento, basta multiplicar as matrizes de escalonamento pelas de peso, como segue,  $W^U_i = W_i / R_{S,i}$  e  $Q^U_{,i} = Q_i \times L_{S,i}$ .  $W^U$  e  $Q^U$ , neste caso, são as matrizes de peso para o sistema não escalonado  $G(s)$  e os subíndices  $j$  é o elemento  $(j,j)$  de cada matriz.

### 3.METODOLOGIA DE BUSCA E RECONHECIMENTO DE CENÁRIOS CRÍTICOS

A idéia básica na busca de cenários críticos está no reconhecimento dos pontos que efetivamente colocam limitações no desempenho do sistema em malha fechada. Para o caso estudado neste artigo, foi definido como principal fator limitante do desempenho a presença de zeros de transmissão de fase não mínima. Quando um sistema apresenta um zero de transmissão com parte real positiva, ou de fase não mínima, isto significa que uma ação de controle agressiva pode levar o sistema à instabilidade. Nos casos onde um sistema originalmente não possui zeros de fase não mínima, mas um subsistema deste sim, e este subsistema pode vir a surgir a partir da saturação de variáveis manipuladas, muitas vezes o controlador configurado para o sistema nominal se torna muito agressivo, e quando o sistema é levado ao cenário problemático, os operadores são obrigados a desativar o sistema de controle.



Na busca de um estudo mais aprofundado onde os cenários problemáticos possam ser identificados, e a partir de então o engenheiro de controle possa decidir pela utilização de diferentes sintonias para os diferentes cenários, ou então por uma postura conservativa, onde uma sintonia menos agressiva é capaz de operar em todos os cenários. A estrutura de busca baseia-se na simples combinação dos subsistemas a partir da eliminação de um par de variáveis manipulada/controlada. Considerando-se como exemplo o sistema original com quatro variáveis manipuladas e quatro controladas na forma matricial abaixo:

$$G = \begin{bmatrix} M1C1 & M2C1 & M3C1 & M4C1 \\ M1C2 & M2C2 & M3C2 & M4C2 \\ M1C3 & M2C3 & M3C3 & M4C3 \\ M1C4 & M2C4 & M3C4 & M4C4 \end{bmatrix}$$

onde  $M_iC_j$  corresponde à função de transferência da variável manipulada  $M_i$  para a controlada  $C_j$ . Com a perda de um grau de liberdade podem se formar quatro subsistemas, a partir da eliminação de uma linha e uma coluna para cada um dos elementos da diagonal principal, assim são possíveis quatro subsistemas

$$G_1 = \begin{bmatrix} M2C2 & M3C2 & M3C3 \\ M2C3 & M3C3 & M3C4 \\ M2C4 & M3C4 & M3C4 \end{bmatrix}$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} M1C1 & M3C1 & M4C1 \\ M1C3 & M3C3 & M4C3 \\ M1C4 & M3C4 & M4C4 \end{bmatrix}$$

$$G_3 = \begin{bmatrix} M1C1 & M2C1 & M4C1 \\ M1C2 & M2C2 & M4C2 \\ M1C4 & M2C4 & M4C4 \end{bmatrix}$$

$$G_4 = \begin{bmatrix} M1C1 & M2C1 & M3C1 \\ M1C2 & M2C2 & M3C2 \\ M1C3 & M2C3 & M3C3 \end{bmatrix}$$

Caso se deseje estudar o sistema para a possibilidade de perda de dois graus de liberdade ao mesmo tempo, será necessário que se repita o procedimento para cada um dos subsistemas já gerados, e no total surgirão mais doze subsistemas, porém alguns deles serão equivalentes. Por exemplo o sistema

$$G_5 = \begin{bmatrix} M2C2 & M3C2 \\ M2C3 & M3C3 \end{bmatrix}$$

pode ser gerado a partir da exclusão da linha e coluna referente ao elemento (3,3) de  $G_1$  ou ao elemento (1,3) de  $G_4$ . O algoritmo é capaz de reconhecer modelos repetidos para não duplicá-los.

O algoritmo de busca faz uma varredura a partir do sistema original, utilizando a perda do número de graus de liberdade que o usuário escolher, sendo que para cada novo sistema gerado é verificada a existência de fase não mínima. Quando esta se faz presente o subsistema é armazenado para análise.

## 4. ESTUDO DE CASO

### 4.1 Apresentação do problema

Como exemplo do tipo de resultado que um adequado estudo de cenários pode trazer, apresentamos aqui a utilização das metodologias de ajuste e verificação de cenários críticos para um sistema de quatro tanques de níveis acoplados, apresentado com detalhes por Johansson (2000). No artigo, o autor apresenta o problema discutindo detalhadamente o surgimento e o efeito de um zero de transmissão de fase não mínima no sistema, testando controladores tipo PID para controlar os níveis de dois tanques manipulando as vazões de entrada. A planta foi especialmente desenhada para o estudo de problemas de controle multivariável, apresentando a peculiaridade de, em um sistema de simples construção, possuir um zero de transmissão que pode ser manipulado,

podendo ser levado para o semi-plano direito do plano real-complexo. Com isto, é possível verificar neste problema os efeitos de resposta inversa em sistemas multivariáveis, a influência da direção dos zeros e a limitação que este efeito traz ao sistema quando se deseja manter o sistema em malha fechada. A figura 1 mostra esquematicamente o sistema de quatro tanques.

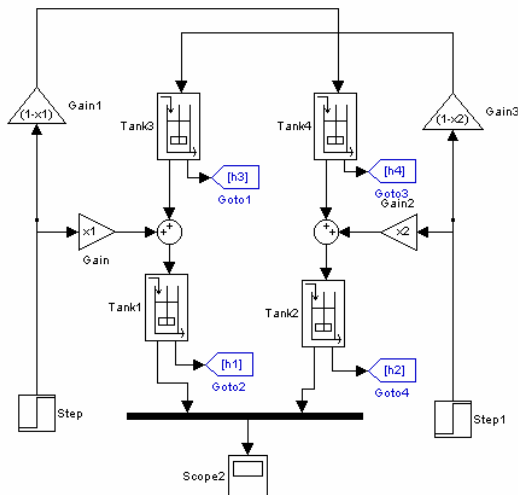


Figura 1 – Representação esquemática do sistema de quatro tanques.

Neste trabalho, utilizamos o sistema de quatro tanques para apresentar o comportamento de um sistema de controle em diferentes cenários. Para tanto, o número de variáveis do sistema foi aumentado, buscando o controle também dos níveis dos tanques superiores, com a manipulação das válvulas de distribuição da vazão.

As variáveis de saída foram denominadas L1, L2, L3 e L4, para os níveis dos tanques 1 a 4, e as variáveis de entrada foram chamadas F1 e F2 para as vazões de entrada e x1 e x2 para as razões de distribuição da vazão de líquido entre os tanques inferiores e superiores.

A partir desta representação, foram obtidos modelos lineares para os dois pontos de

operação onde o autor se ateve, com e sem a presença de zero positivo. Para o sistema ampliado, com a possibilidade de controle do nível dos quatro tanques, não se verificou a existência de zeros de transmissão.

#### 4.2 Possíveis cenários estudados

Para que se possa diferenciar dois cenários em um sistema, é necessário que alguma limitação do processo faça com que uma determinada característica se torne presente ou ausente, com dependência apenas do ponto de operação.

Para uma proposta de diferentes cenários, do ponto de vista de controle, para o sistema de quatro tanques, trabalhou-se com as razões de distribuição de vazão no ponto de operação de fase não mínima, onde podem ocorrer limitações e problemas de controle.

Com o sistema operando com todos os níveis sob controle, é possível manter as malhas com uma determinada velocidade de atuação. No caso de ocorrer a saturação das variáveis de entrada que controlam os tanques superiores (x1 e x2), perde-se o controle destes e o sistema fica reduzido a um subsistema, apresentando o zero de transmissão de fase não mínima em 0.01276. Deste modo, um controlador devidamente ajustado para o cenário onde os quatro níveis estão em malha fechada deve apresentar problemas quando são perdidos os graus de liberdade referentes aos divisores de fluxo.

#### 4.3 Utilização da metodologia RPN para análise do sistema

Com o sistema linearizado do sistema no ponto de operação estacionário definido por  $x1 = 0.43$ ,  $x2 = 0.34$ ,  $F1 = 9.891$ ,  $F2 = 10.36$ , o primeiro passo é decidir o emparelhamento do sistema. Analisando-se os valores do ganho estacionário para o sistema em malha aberta e emparelhamento original (F1-L1, F2-L2, x1-



L3, x2-L4), tem-se os valores ilustrados na tabela 1.

Tabela 1 – Ganhos estacionários para o modelo nominal.

	L1	L2	L3	L4
F1	0.96	1.48	22.18	-23.24
F2	1.63	0.97	-28.42	29.78
x1	0	0.91	0	-14.33
x2	1.00	0	-17.49	0

Nota-se imediatamente que a variável x1 não tem efeito sobre os níveis estacionários 1 e 3, enquanto x2 não afeta L2 e L3.

A análise da matriz de ganhos relativos para o problema nos traz os resultados da tabela 2, de onde o emparelhamento ideal para o problema é definido, mantendo-se L1-F1 e L2-F2, invertendo-se os demais canais, de forma a pará-lo na forma L3-x2, L4-x1.

Tabela 2 – RGA estacionário do modelo nominal.

	L1	L2	L3	L4
F1	0.43	0	0.57	0
F2	0	0.34	0	0.66
x1	0	0.66	0	0.34
x2	0.57	0	0.43	0

Para a definição do desempenho desejado para o sistema em malha fechada, analisou-se a resposta do mesmo em malha aberta. O tempo de subida canal por canal é apresentado na tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Tempo de subida para o sistema em malha aberta, canal a canal.

	L1	L2	L3	L4
F1	138	173	173	138
F2	253	203	203	253
x2	-	85	85	-
x1	124	-	-	124

Nota-se uma pequena diferença entre as dinâmicas dos canais da diagonal referentes aos tanques superiores e inferiores, porém, para definição do desempenho desejado, preferiu-se utilizar o mesmo conjunto de parâmetros para todas as saídas, definindo-se um desempenho desejado com tempo de subida de 40 segundos (cerca de quatro vezes mais rápido que o sistema em malha aberta) e um overshoot de 10%.

#### 4.4 Sintonia dos controladores MPC pela metodologia RPN

Para o sistema com quatro variáveis controladas, a utilização da metodologia de ajuste apresentada no ponto 3 deste trabalho traz os seguintes resultados:

$$\begin{aligned}ts &= 8.7 & P &= 12 & M &= 3 \\Q &: [0.7071 \ 0.7071 \ 0.7071 \ 0.7071] \\W &: [0.6100 \ 0.6100 \ 0.6100 \ 0.6100] \\Ls &: [1.7727 \ 2.4699 \ 2.0105 \ 2.0350] \\Rs &: [1.0677 \ 0.9403 \ 0.0440 \ 0.0547]\end{aligned}$$

A utilização destes parâmetros de controle para a simulação do sistema em malha fechada com mudança de setpoint da variável L1 em uma unidade tem como resultado as curvas mostradas na figura 2.

Já com a perda do controle sobre as variáveis de entrada referentes à divisão do fluxo (saturação de x1 e x2), mantendo-se o mesmo controlador em operação, malha instabiliza, como mostra a figura 3. Nota-se claramente que a tentativa de aumentar a velocidade da malha conflita com a limitação imposta pelo zero de fase não-mínima do processo quando este perde graus de liberdade, de tal forma que o controlador aumenta indefinidamente a ação de controle, até a saturação.

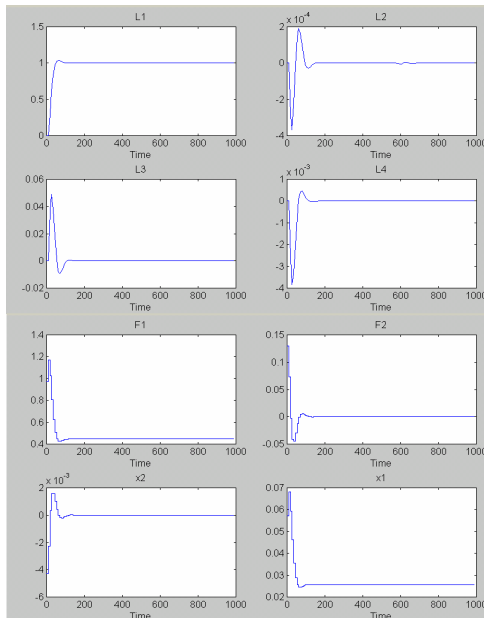


Figura 2 – Resultados da simulação do sistema com todos os graus de liberdade para mudança de setpoint na variável L1.

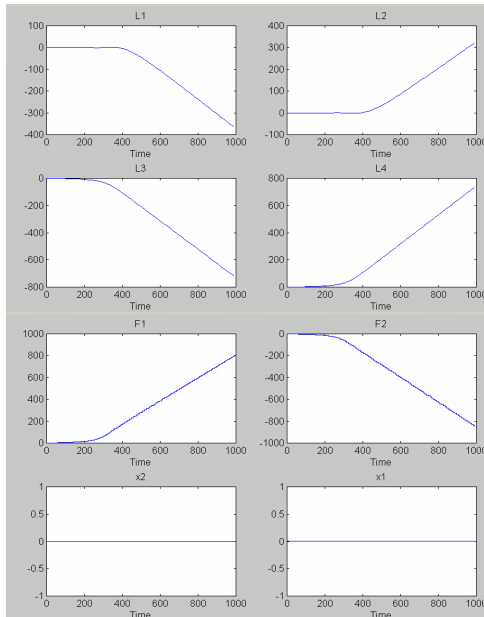


Figura 3 – Resultados da simulação do sistema com perda de dois graus de liberdade para mudança de setpoint na variável L1.

Re-sintonizando o controlador para a nova configuração onde apenas duas variáveis manipuladas estão disponíveis, levando em

conta as limitações do processo, os parâmetros do controlador ficam

ts: 37.8 P: 8 M: 2

Q: [0.7650 0.7658] W: [1.3287 1.3275]

Ls: [1.0983 1.3503] Rs: [1.0000 0.9778]

E a simulação do processo nas mesmas condições levam aos resultados da figura 4.

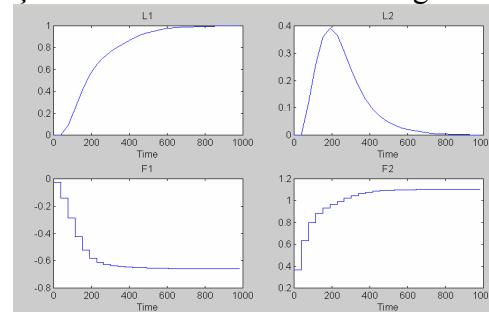


Figura 4 – Resultados da simulação do sistema sintonizado levando em conta as limitações do processo e mudança de setpoint na variável L1.

## 5.CONCLUSÕES

As metodologias de ajuste e de busca de cenários problemáticos na utilização de controladores preditivos se mostraram importantes ferramentas no projeto e implantação de um sistema de controle multivariável.

A aplicação destas ferramentas a um sistema simples como a unidade de quatro tanques permitiu avaliar o potencial das metodologias e a facilidade de aplicação das mesmas.

## 6.BIBLIOGRAFIA

- FARINA, L. A. RPN-Toolbox: Uma Ferramenta para a Seleção de Estruturas de Controle, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000
- GRIMBLE, M. J. Generalised predictive control: An introduction to the advantages and limitations, Int. J. Syst. Sci., 23, 85, 1992
- SANTINA, M.S., STUBBERUD, A.R., HOSTETTER, G.H. Sample-Rate Selection, in the Control Handbook, CRC press, pp.313-321, 1996
- TRIERWEILER, J.O. and L. A. FARINA, “RPN tuning strategy for model predictive control”, Journal of Process Control V. 13, pp. 591-598, (2003)