

# UMA CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE ROTINAS DE CONTROLE PREDITIVO EM SCILAB

T. C. S. P. BATISTA<sup>1</sup> e T. V. COSTA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Engenharia Química  
E-mail para contato: thiagocosta@unifei.edu.br

**RESUMO** – As indústrias, cada vez mais, têm empregado técnicas de controle avançado em sua produção em busca de maior produtividade e competitividade. Uma das técnicas mais utilizadas é o Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC), algoritmo que faz uso do modelo da planta para a obtenção de uma sequência de ações de controle, por meio de uma rotina de otimização. Assim, o presente trabalho teve como objetivos o estudo e a aplicação experimental de uma variação do MPC, o Controle Preditivo Generalizado (GPC). Para isso, o algoritmo GPC foi implementado no *software* livre Scilab, através de diagrama de blocos considerando o módulo Xcos. Para fins de validação, o algoritmo de controle implementado foi aplicado a um protótipo de controle experimental. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência do algoritmo GPC em controlar processos simples e complexos, com ou sem restrições. Verificou-se ainda a elevada capacidade do *software* livre Scilab na análise experimental de estruturas de controle avançado em problemas da Engenharia Química.

## 1. INTRODUÇÃO

O controle e a automação de processos apresentam extrema importância na prática industrial, pois possibilitam a geração de produtos com características uniformes, de alta qualidade e capazes de atender as especificações dos clientes e as legislações ambientais. Além disso, o controle garante a segurança dos processos e permite que o sistema trabalhe nas condições de operação desejadas.

Dentre as técnicas de controle avançado adotadas no meio industrial, uma das mais utilizadas, principalmente na indústria química, e uma das poucas capazes de controlar eficientemente sistemas multivariáveis, com restrições e não linearidades é o controle preditivo baseado em modelo (MPC). O MPC corresponde a uma classe de métodos de controle que utilizam o modelo do processo para prever o comportamento futuro da planta e, assim, implementar uma rotina de otimização para o cálculo de uma sequência ótima de ações de controle.

Uma das ferramentas computacionais que podem suportar a implementação de algoritmos de controle preditivo é o Scilab, um *software* livre e em código aberto (*opensource*) para computação numérica, que pode ser executado em diversas plataformas

(Patil *et al.*, 2012). Embora seu uso em aplicações experimentais ainda seja modesto comparado a *softwares* proprietários, observa-se um aumento gradual em sua utilização no desenvolvimento e análise de estruturas de controle. Como exemplos, pode-se citar seu uso no teste de estruturas de controle avançado utilizando interface com linguagem C# e comunicação Modbus (Sencio *et al.*, 2013) e também em sistemas mecatrônicos que utilizam tecnologia baseada no protocolo de comunicação digital CAN (*Controller Network Area*) (Bucher e Balemi, 2010).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivos o estudo e a avaliação da estratégia GPC (algoritmo pertencente à classe dos controladores MPC), a implementação da técnica em Scilab a partir de diagrama de blocos no módulo Xcos e a aplicação do GPC a um sistema experimental, para fins de validação do algoritmo implementado. Busca-se também verificar a eficiência do método GPC no controle de processos sob a imposição de restrições. Procura-se, deste modo, apresentar uma contribuição ao desenvolvimento e implementação de rotinas de controle preditivo em Scilab e disseminar o uso do *software* livre na análise experimental de estruturas de controle avançado em problemas da Engenharia Química.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Fundamentação teórica

A Equação 1 representa a função objetivo do problema de otimização do controlador GPC. Neste trabalho, optou-se por utilizar um modelo em equações de diferença com estrutura ARX (*autoregressive model with exogenous input*) de acordo com a restrição de igualdade apresentada na Equação 2. Além disso, outros tipos de restrição a que o problema de otimização pode estar sujeito são restrições de desigualdade sobre a velocidade da variável de controle ( $\Delta u$ ) e sobre a amplitude da variável de controle ( $u$ ).

$$\underset{\Delta U}{\text{minimizar}} J = (\hat{Y} - Y_{ref})^T \bar{Q}_y (\hat{Y} - Y_{ref}) + \Delta U^T \bar{Q}_u \Delta U \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito à:} \quad & \hat{Y} = G\Delta u + H'Y_{passado} + H''\Delta u_{passado} \\ & u_{min} \leq u(k-1) \leq u_{max} \\ & \Delta u_{min} \leq \Delta u(k-1) \leq \Delta u_{max} \end{aligned} \quad (2)$$

Sendo  $\hat{Y} \in \mathbb{R}^{Hp}$  a saída predita do modelo do processo no horizonte de predição  $Hp$ ;  $Y_{ref} \in \mathbb{R}^{Hp}$  o vetor da trajetória de referência;  $\Delta U \in \mathbb{R}^{Hc}$  o vetor de saídas no horizonte de controle  $Hc$  e  $\bar{Q}_y \in \mathbb{R}^{Hp \times Hp}$  e  $\bar{Q}_u \in \mathbb{R}^{Hc \times Hc}$  matrizes bloco diagonais baseadas nas matrizes de pesos para as saídas (variáveis manipuladas) e entradas (variáveis controladas), respectivamente. Observa-se ainda que  $G$ ,  $H'$ ,  $H''$ ,  $Y_{passado}$ ,  $\Delta u_{passado}$ , são matrizes e vetores obtidos pela recursão do modelo de predição ARX, conforme detalhado em Rossiter (2003).

Para os processos em que é necessário levar em conta as restrições, o problema de controle não possui uma solução analítica, devendo ser resolvido, a cada intervalo de amostragem, através de métodos de programação quadrática (QP, *quadratic programming*). Métodos numéricos eficientes na solução dos problemas QP estão disponíveis em rotinas

computacionais, e consideram as matrizes características do problema de otimização e suas restrições em seus cálculos. Neste trabalho, utilizou-se a rotina *qpsolve* do *software* Scilab.

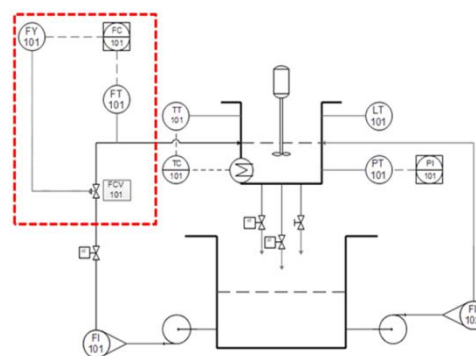
## 2.2. Protótipo experimental de controle

Para fins de validação da estratégia de controle estudada no presente trabalho, foi utilizado o protótipo instrumentado de controle de processos apresentado na Figura 1 a seguir.

Figura 1- Protótipo experimental de controle de processos Edibon UCP-UB



(a) Protótipo experimental



(b) Diagrama de instrumentação

O sistema consiste em um tanque de abastecimento conectado a duas bombas centrífugas que alimentam as correntes de entrada para o tanque superior. Existem três possíveis malhas de controle: nível, vazão e temperatura. Verificou-se que a malha de vazão para este processo representava maiores desafios, como dados sujeitos a ruído de instrumentação e a exigência de uma alta frequência de amostragem para coleta de dados. Por essa razão e devido ao mau funcionamento do atuador referente à malha de temperatura, impossibilitar um estudo em cenário multivariável adequado, escolheu-se aplicar o controle GPC à vazão da corrente que alimenta o tanque superior, conforme indicado na Figura 1 (b). O controle da vazão foi realizado utilizando como variável manipulada a porcentagem de abertura da válvula eletrônica de controle (FCV-101).

O protótipo experimental possui originalmente um software proprietário que não contempla o uso de estruturas de controle avançado. Deste modo, houve a necessidade de implementar rotinas em Scilab para leitura de dados e atuação na unidade de controle por meio de uma interface de comunicação, permitindo que o algoritmo de otimização com restrições fosse utilizado no cálculo das ações de controle. A comunicação do *software* Scilab com a planta do processo foi realizada através de uma placa de aquisição *National Instruments* (módulo de aquisição NI-6220). As rotinas computacionais de interface entre o processo e o computador usado na comunicação e aquisição de dados foram implementadas a partir do módulo denominado NI-DAQmx, que consiste num conjunto de funções disponíveis em uma *dll* (*Dynamic Link Library*) disponibilizadas pelo desenvolvedor da placa de comunicação. A interface entre tais rotinas e o Scilab foi realizada com base em um *toolbox* NIDAQ (versão 0.3.1) de rotinas em linguagem C que permite a leitura e escrita das variáveis do processo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

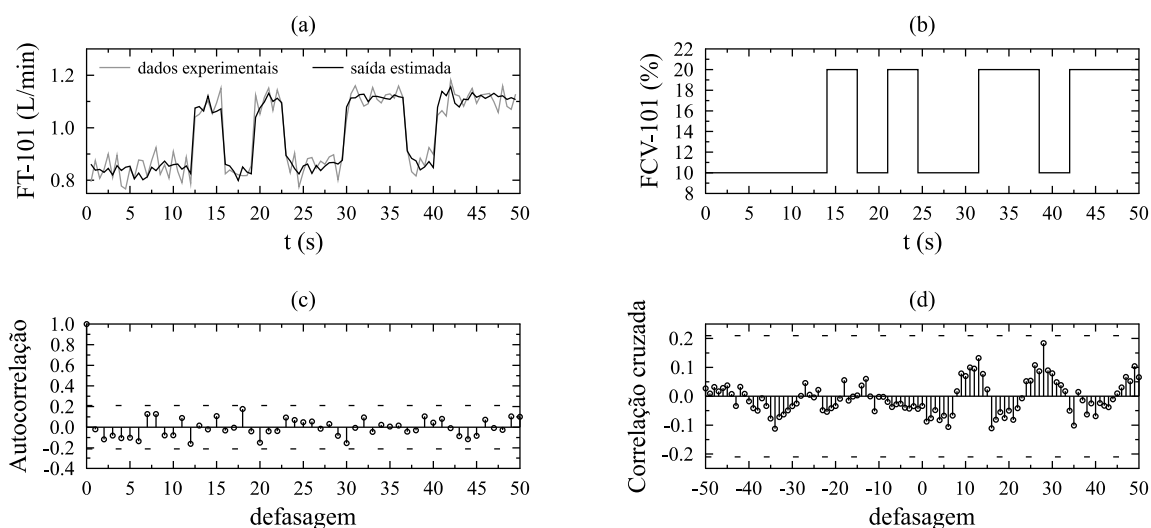
#### 3.1. Identificação e validação do modelo

A obtenção dos dados para a identificação do modelo do processo foi realizada em malha aberta por meio de alterações na variável manipulada aplicando-se um sinal PRBS (*Pseudo-Random Binary Sequence*) durante 50 segundos, conforme a Figura 2 (b). O tempo de amostragem empregado no sistema foi de 0,5 segundos. Foram realizados dois testes independentes, gerando assim dois conjuntos de dados distintos. O primeiro conjunto foi usado para identificar o modelo dinâmico do sistema e o segundo, para fins de validação. A partir dos dados do primeiro conjunto foram estimados os parâmetros de um modelo ARX de acordo com a Equação (3), sendo  $Y(z)$  a variável de saída correspondente à vazão da corrente de alimentação (L/min) e  $U(z)$  a variável de entrada correspondente à porcentagem de abertura de válvula (%). A comparação entre os dados do processo utilizados para validação e os dados do modelo ARX pode ser observada na Figura 2 (a).

$$Y(z) = \frac{0,0220z^{-1} + 0,0028z^{-2} - 0,0044z^{-3} - 0,0027z^{-4} - 0,0079z^{-5} - 0,0089z^{-6}}{1 - 0,011z^{-1} - 0,215z^{-2} - 0,262z^{-3} - 0,148z^{-4} - 0,330z^{-5} - 0,021z^{-6}} U(z) \quad (3)$$

A análise da capacidade de generalização do modelo foi realizada a partir das funções auto-correlação (FAC) e correlação cruzada (FCC) conforme apresentada nas Figuras 2 (c) e 2 (d). Como as funções não ultrapassam o intervalo de confiança, pode-se afirmar que o ruído do processo não está autocorrelacionado e não há correlação entre o ruído e o sinal de entrada PRBS aplicado à planta. Assim, pode-se afirmar que o modelo identificado possui bom desempenho em descrever a dinâmica do processo e tem capacidade de generalização, podendo ser utilizado de forma eficiente para um conjunto de dados diferentes.

Figura 2 – Validação e análise do modelo identificado

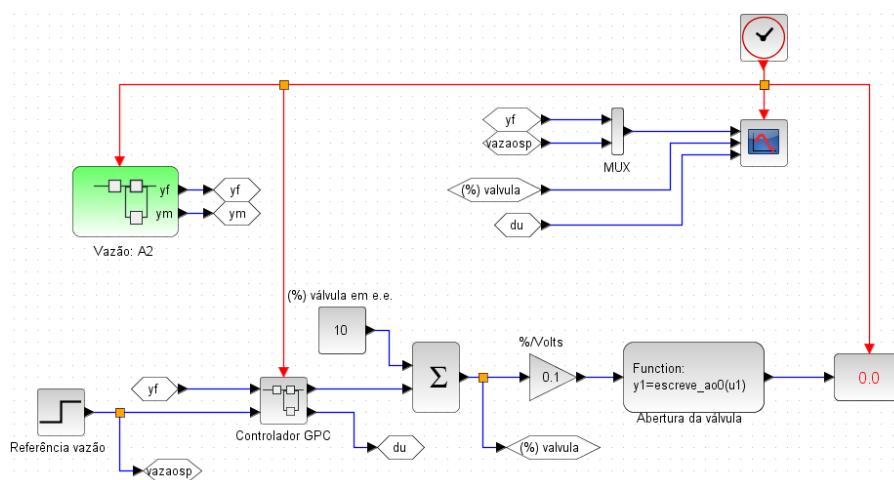


#### 3.2. Projeto e sintonia do controlador

O controlador GPC foi desenvolvido e implementado em Scilab a partir de diagrama de

blocos no módulo Xcos (Figura 3), de acordo com as seguintes etapas: (i) leitura e aquisição de dados do processo; (ii) predição da saída utilizando o modelo identificado e os dados obtidos; (iii) cálculo do desvio da saída em relação à referência; (iv) cálculo da sequência de ações de controle a partir da solução do problema de otimização; (v) implementação do primeiro elemento da sequência de controle.

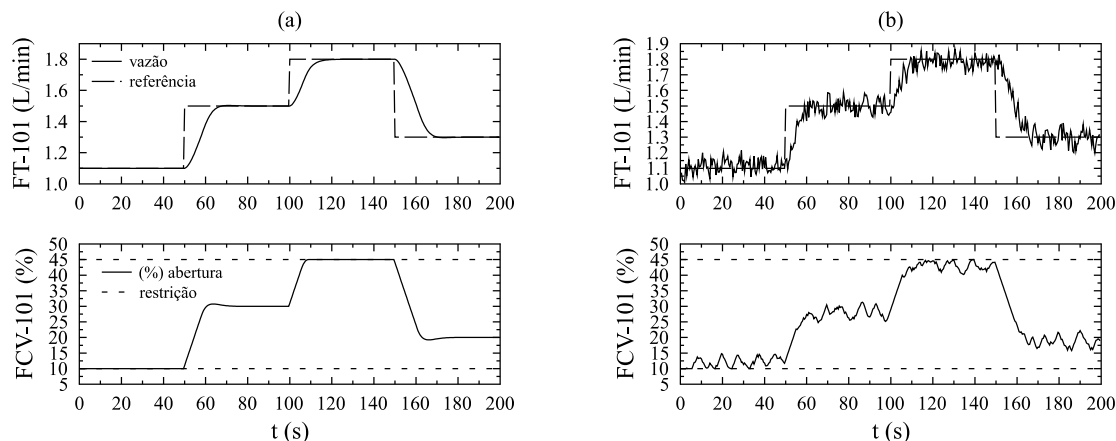
Figura 3 – Diagrama em Xcos com controlador GPC aplicado ao controle de vazão do protótipo experimental de controle de processos.



A sintonia do controlador foi realizada de acordo com Moudgalya (2007) e os parâmetros obtidos foram:  $H_p = 30$ ,  $H_c = 10$ ,  $q_y = 10$  e  $q_u = 0,01$ . Foram ainda aplicadas restrições sobre o incremento da variável de controle ( $\Delta u$ ) e sobre a ação de controle ( $u$ ), sendo:  $-1 \% \leq \Delta u \leq 1 \%$  e  $0 \% \leq u \leq 45 \%$ .

Para demonstrar a eficácia do algoritmo de controle, simulação e testes experimentais em malha fechada foram realizados. Uma sequência de alterações no *setpoint* de vazão (1,1 L/min – 1,5 L/min – 1,8 L/min – 1,3 L/min) foi aplicada e as ações do sistema de controle observadas conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Simulação e experimento em malha fechada para o controle de vazão.





Primeiramente, aplicou-se o algoritmo de controle GPC com a sintonia proposta em um modelo simplificado do processo, identificado a partir de uma perturbação degrau e aproximado para um sistema de primeira ordem com tempo morto. Os resultados da simulação em malha fechada são apresentados na Figura 4 (a), na qual observou-se um bom desempenho do sistema de controle. Em seguida, o mesmo algoritmo de controle foi aplicado ao processo experimental e as respostas do sistema podem ser vistas na Figura 4 (b).

A partir da comparação dos resultados da simulação e dos resultados experimentais, é possível notar que o comportamento do sistema real se aproximou muito da simulação realizada. Além disso, a análise do comportamento em malha fechada permite verificar que, como esperado, o controlador GPC se mostrou apto em alcançar os objetivos de controle estabelecidos, mantendo a variável de saída (vazão) na referência desejada, sem infringir os limites impostos à variável de entrada (restrições sobre a ação de controle).

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu no estudo, avaliação e implementação da estratégia de controle preditivo generalizado (GPC) no *software* livre Scilab por meio de diagramas de blocos do módulo Xcos, com posterior aplicação a um sistema experimental de controle de vazão. Com base no estudo de caso foi possível apresentar o uso do software livre na análise de estruturas de controle avançado e demonstrar a capacidade que o Scilab apresenta em auxiliar o desenvolvimento e análise de controladores preditivos. O controlador GPC implementado apresentou bom desempenho mesmo em casos com restrições, sendo capaz de atingir os objetivos de controle determinados, sem infringir as restrições estabelecidas. É importante ressaltar ainda que o algoritmo de controle foi executado no intervalo de amostragem sem que problemas no cálculo das ações de controle tenham sido identificados. Dessa forma, pôde-se comprovar a eficiência do controlador preditivo baseado em modelo no controle de problemas de Engenharia Química a partir de uma ferramenta livre e em código aberto.

#### 5. REFERÊNCIAS

- BUCHER, R.; BALEMI, S.; MEZA, C.. Open Source Applications for Rapid Control Prototyping in Education Laboratories , *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, Bonito, p. 12-16, 2010.
- MOUDGALYA, K., *Digital Control*. England, John Wiley & Sons, 2007.
- PATIL, J., DUBEY, B., MOUDGALYA, K. , PETER, R., GNURadio, Scilab, Xcos and COMEDI for Data Acquisition and Control: An Open Source Alternative to LabVIEW, *8th IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes*, p. 626-631, 2012.
- ROSSITER, J., *Model-based predictive control: a practical approach*. CRC press, 2003.
- SENCIO, R., COSTA, T., SILVA, F., Desenvolvimento de uma ferramenta para aplicação experimental e avaliação de estruturas de controle avançado, *X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica*, 2013.