

## FRONTEIRAS E DESAFIOS EM GERENCIAMENTO DE MALHAS DE CONTROLE

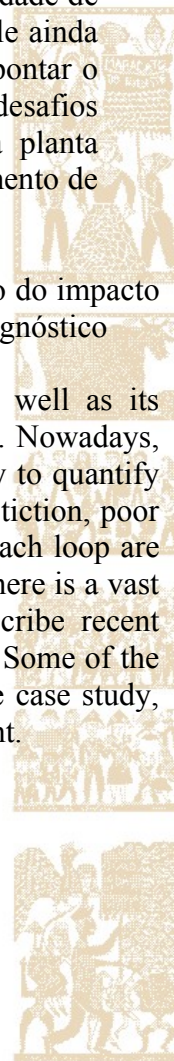
M. Farenzena, J. O. Trierweiler

Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL  
Telefone: (xx-51) 3308-4072 – Fax: (xx-51)3308-3299 –  
Email: {farenz,jorge}@enq.ufrgs.br

**RESUMO** – Os benefícios de auditar controladores e o impacto destas ferramentas em refinarias, petroquímicas e outras indústrias de processo são conhecidos. Atualmente, o termo auditar controladores, ou gerenciá-los, tem um sentido mais amplo que não se resume a avaliar seu desempenho. Diagnosticar distúrbios de planta inteira, apontar a fonte deste distúrbio, avaliar a saúde da válvula de controle, quantificar o impacto econômico de cada controlador são possíveis de forma automática, sem a necessidade de testes invasivos. Por outro lado, o campo de gerenciamento de malhas de controle ainda oferece um vasto espaço para desenvolvimentos. Este é o foco deste trabalho: apontar o estado-da-arte na área de gerenciamento de controladores, mostrando também os desafios ainda presentes. Algumas das metodologias descritas foram aplicadas a uma planta petroquímica, fornecendo resultados conclusivos de forma a permitir um real aumento de sua rentabilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Auditoria de malhas; avaliação da performance; avaliação do impacto econômico de controladores; distúrbios de planta inteira; válvula de controle – diagnóstico

**ABSTRACT** – The impact of control loop performance assessment tools as well as its benefits are widespread in refineries, petrochemical and other process industries. Nowadays, assess control loop performance has a wider meaning that goes further than only to quantify loop performance. To diagnose plant-wide disturbances, to point its root cause (stiction, poor tuning or disturbances) and its source, and to evaluate the economic benefit of each loop are possible with the methodologies developed in the last years. On the other hand, there is a vast field to new developments in this area. This is the scope of this work: describe recent methodologies to manage control loops, showing the challenges that still remain. Some of the described methodologies were applied in a petrochemical plant, as shown in the case study, reducing products variability, allowing to achieve a more profitable operating point.

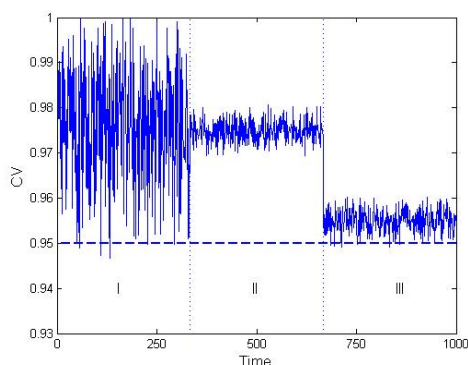


## 1. INTRODUÇÃO

O termo “auditoria de controladores” foi inserido recentemente no vocabulário do engenheiro de processo. A necessidade e os conseqüentes benefícios foram responsáveis pelo novo jargão.

**Necessidade:** Estudos mostram que cerca de 80% das malhas industriais apresentam potencial de melhora em seu desempenho ou apresentam alguma avaria em sua instrumentação (Bialkowski, 1993). Boa parte destas malhas tem impacto significativo na qualidade dos produtos.

**Benefícios:** A Figura 1 ilustra os três cenários comuns no processo de auditoria de malhas. No cenário inicial (I), o processo possui variabilidade elevada. Reduzir a variabilidade dos produtos (cenário II) permite a planta atingir um ponto de operação mais lucrativo (cenário III), mais próximo da especificação.



**Figura 1:** Três etapas comuns no processo de auditoria de malhas. Neste caso a especificação é 0.95.

O resultado da aplicação de ferramentas comerciais corrobora o impacto da auditoria de malhas. Estudos reportam os seguintes resultados (Bialkowski, 1993):

- Redução na variabilidade dos produtos entre 30% e 50%.
- Redução no consumo de energia de cerca de 5%.
- Elevação na carga processada de cerca de 2% a 5%.

O trabalho que permitiu a grande difusão da auditoria de controladores foi proposto por Harris (1989), onde este propunha utilizar como padrão para avaliação do desempenho o controlador de variância mínima. O chamado índice de Harris ( $\eta$ ) é expresso por:

$$\eta(d) = 1 - \frac{\sigma_{MV}^2}{\sigma_y^2} \quad (1)$$

Seu grande advento foi permitir a avaliação do desempenho de controladores de forma automática, necessitando apenas de dados de operação normal e do tempo morto da malha ( $d$ ). Após este trabalho, uma série de metodologias para auditar controladores de forma automática foi proposta. Uma série de revisões acerca de auditoria de malhas tanto para controladores monovariáveis quanto multivariáveis está disponível na literatura (Huang et al., 1997, Jelali, 2006, Qin, 1998).

Hoje, o termo auditoria de controladores possui um sentido mais amplo: não se resume apenas detectar os controladores que possuem performance distante do ótimo. Modernas metodologias e ferramentas permitem:

- avaliação do par desempenho/robustez;
- detecção de problemas no atuador;
- detecção de distúrbios periódicos;
- quantificação do impacto econômico.

Este é o escopo deste trabalho: descrever as principais metodologias para gerenciamento de malhas de controle nas áreas acima mencionadas, expondo os desafios existentes nesta área.

Este artigo é segmentado da seguinte forma: na seção 2 as metodologias para avaliação do desempenho e robustez de controladores serão mostradas. Na seção 3, metodologias para o diagnóstico e a quantificação de problemas no atuador serão descritas. Subseqüentemente, a detecção e isolamento de distúrbios periódicos será abordada. Na seção 5, as metodologias para quantificar o impacto econômico de malhas serão apresentadas. O caso de estudo envolvendo uma planta petroquímica será apresentado na seção 6. O artigo finaliza com as conclusões finais.

## **2. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO /ROBUSTEZ**

Auditar o desempenho de controladores significa comparar um dado indicador com um valor de referência. O indicador mais difundido, denominado índice de Harris compara a variância atual da malha, com sua variância mínima. Apesar de amplamente utilizado, este indicador possui uma série de limitações (Farenzena e Trierweiler, 2006). As principais podem ser sumarizadas em:

- avaliação do par desempenho/robustez;
- detecção de problemas no atuador;
- detecção de distúrbios periódicos;
- quantificação do impacto econômico.

Uma formulação alternativa e inovadora para avaliar o desempenho e robustez de malhas de controle foi proposta por Farenzena e

Trierweiler (2006). A partir de indicadores que possam ser quantificados em tempo real, de forma não invasiva e alguns indicadores da malha como o tempo morto e a constante de tempo, é possível estimar indicadores universais como a razão entre os tempos de subida de malha aberta e fechada, máxima sensibilidade, margem de ganho, entre outros (Seborg et al., 2004).

Esta metodologia apresenta resultados superiores aos índices baseados no controlador de variância mínima, fornecendo indicadores universais que permitem não só o acompanhamento do par desempenho/robustez de um malha, mas também comparar o comportamento de diversas malhas. Esta afirmação será corroborada no caso de estudo apresentado na seção 6.

Apesar da grande aplicação/difusão das ferramentas e metodologias para auditoria de controladores monovariáveis, o mesmo cenário não é visto para controladores multivariáveis, principalmente preditivos. Apesar de sua grande utilização industrial, metodologias para avaliar sua performance, a qualidade do modelo e sua camada de otimização econômica ainda são um desafio para a academia. Poucos trabalhos têm sido publicados e suas considerações os afastam do cenário industrial, pois testes invasivos são necessários ou o conhecimento do distúrbio é requerido (Patwardhan e Shah, 2002).

## **3. DETECÇÃO DE PROBLEMAS NO ATUADOR**

Estudos em plantas da América do Norte (Bialkowski, 1993) mostram que cerca de 20% das válvulas de controle apresentam avarias que deterioram a performance do processo. A presença de agarramento acarreta distúrbios periódicos (ciclos-limite) que podem se propagar em toda a planta, deteriorando a qualidade dos produtos. Razão pela qual uma série de estudos acerca da saúde da válvula de controle é

encontrada na literatura. O foco central das metodologias está na detecção do agarramento (*stiction*). A definição desta avaria pode ser encontrada em (Shoukat Choudhury et al., 2004).

Há na literatura uma série de metodologias para diagnosticar o agarramento em válvulas de controle. Rossi e Scali (2005) propõem uma metodologia baseada na interpolação das curvas padrões observadas em malhas onde as válvulas apresentam agarramento (triangular e resposta de primeira ordem ao relé) e o padrão de malhas oscilatórias onde não há agarramento (comportamento senoidal).

Shoukat Choudhury et al. (2004) propõem uma metodologia que utiliza apenas dados de operação normal para detectar o agarramento. Assumindo que o processo opera em um ponto fixo, com comportamento linear, a presença de um padrão não-linear e não-gaussiano denota a presença de válvula com avarias. Para quantificar a não-linearidade e a não-Gaussianidade o conceito de Bicoerência e Curtose são utilizados (Shoukat Choudhury et al., 2004).

Yamashita (2006) propõe um método baseado na seqüência de movimentos da saída do controlador. Se esta seguir um padrão retangular, o agarramento é atestado. A partir da área da curva de subida e descida da variável de processo, Singhal e Salsbury (2004) propõe um método para diagnosticar o agarramento.

#### **4. DETECÇÃO DE DISTÚRBIOS PERIÓDICOS**

A presença de distúrbios periódicos afeta a qualidade do produto, sendo sua detecção e eliminação requeridas. Uma boa revisão bibliográfica sobre detecção e isolamento da fonte de distúrbios foi

recentemente realizada por Thornhill e Horch (2007). As causas podem ser (a) perturbação externa, (b) ajuste muito agressivo de controlador ou (c) agarramento em válvula de controle. Entretanto, há uma segunda dificuldade associada: atualmente, devido à integração mássica e energética, as plantas se tornam cada vez mais acopladas, dificultando apontar para a malha que é a fonte da oscilação. Desta forma, duas etapas são necessárias na detecção de distúrbios: apontar a malha que é fonte (ou o conjunto de malhas) e sua causa.

A detecção da fonte de distúrbios periódicos tem sido estudada por vários autores (Ettaleb et al., 1996, Thornhill e Hagglund, 1997, Thornhill et al., 2003, Xia et al., 2005).

O método proposto por Xia et al. (2005) é mencionado por alguns autores como o que apresenta as maiores potencialidades (Thornhill e Horch, 2007). Este se baseia na decomposição em componentes independentes (ICA, Hyvarinen e Oja, 2000) dos sinais de saída das variáveis controladas. Subseqüentemente na seção 6 esta metodologia será aplicada em um caso industrial.

Depois de identificada a fonte do distúrbio, sua causa deve ser apontada. A metodologia introduzida por Shoukat Choudhury et al. (2004) é baseada em estatística de elevada ordem que permite apontar a causa do distúrbio.

#### **5. QUANTIFICAÇÃO DO IMPACTO ECONÔMICO**

Uma planta de uma indústria de processos possui centenas e até milhares de malhas de controle, sendo que boa parte destas possui potencial de melhora em sua performance. Mantê-las em seu desempenho desejado é uma tarefa inviável, mesmo para uma grande equipe de engenharia. Razão esta que obriga a hierarquização da manutenção das malhas. Entretanto, as malhas não devem ser priorizadas



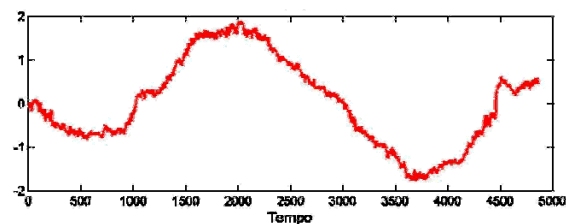


O complexo catalítico entra no reator de pré-polimerização onde o monômero é alimentado através do FC02. A mistura de polímero e monômero não reagido é descarregada continuamente aos dois reatores de polimerização que estão em série. Estes reatores são do tipo loop, onde o monômero líquido é responsável pela circulação do produto dentro do reator. No primeiro a carga é controlada pelo FC01 e a descarga é contínua, no segundo o controle da alimentação ocorre através do FC03 e a descarga é controlada pelo LC01. A descarga do segundo reator, formada por uma mistura de produto, inerte e monômero não reagido, segue para um vaso de flash onde a fase líquida é evaporada e separada do polímero. A saída de produto pelo fundo do vaso é controlada pelo LC02, sendo o produto de fundo o polímero (ainda não apto à comercialização). Os gases do topo seguem então para a área de recuperação, onde uma torre de lavagem é responsável pela remoção de partículas de polímero que tenham sido arrastados com a corrente de topo do vaso de flash. Os gases que saem pelo topo da torre seguem para um condensador. A corrente de monômero condensado segue para o tanque de alimentação, o controle de pressão da torre PC01 atua sobre a vazão desta corrente.

O tanque de alimentação, para onde segue a corrente de monômero recuperado, é responsável pelo fornecimento da matéria-prima para os reatores. Este vaso possui um controlador de nível (LC04) que envia setpoint remoto para um controlador de vazão (FC08) de monômero puro para reposição do tanque. Parte desta corrente segue para um trocador de calor, sobre a vazão desta corrente atua o controlador de pressão do vaso PC02 que garante a estabilidade na pressão de alimentação.

## 6.2 – Isolamento e remoção de distúrbios periódicos

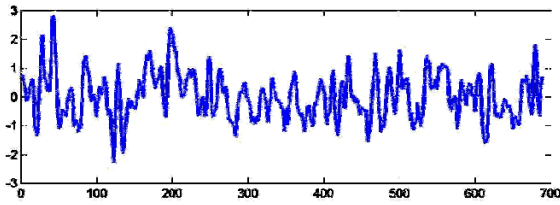
O primeiro problema apresentado pela planta era a oscilação periódica que aumentava a variabilidade dos produtos, conforme ilustrado na Figura 3.



**Figura 3:** Comportamento típico (oscilatório) da variável de processo verificado antes da aplicação da ferramenta (veja que os dados estão normalizados)

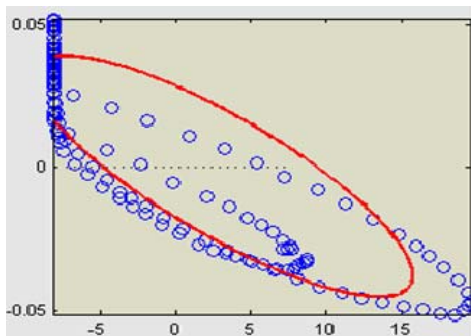
Desejava-se apontar a fonte e a causa desta oscilação. A metodologia do ICA espectral (Xia et al., 2005) foi aplicada. Constatou-se que sua fonte seria as malhas de pressão PC01 e PC02. Para corroborar esta hipótese, cada uma das malhas foi aberta por um período de uma hora e verificou-se o comportamento das variáveis de interesse DC01 e DC02, comparando a alteração percentual na variância.

Verificou-se que esta se reduziu de forma abrupta (veja Figura 4), conforme mostrado na Tabela 1. Esta mostra que a abertura da malha PC01 reduziu 78% a variância da malha DC01 e 88% na malha DC02. Resultados semelhantes foram obtidos quando a malha PC02 foi aberta.



**Figura 4:** Comportamento típico da variável de processo verificado **depois** da aplicação da ferramenta (veja que os dados estão normalizados)

Posteriormente, utilizando as metodologias para análise da instrumentação, conclui-se que a válvula de PC02 agarrava, conforme mostra a curva da Figura 5. Esta válvula apresentava agarramento de 14%.



**Figura 5:** Gráfico da entrada e saída da malha – comportamento típico de válvula com grande agarramento. A linha vermelha mostra a elipse interpolada para a quantificação do agarramento.

### 6.3 – Avaliação do desempenho de controladores

Após a triagem inicial, constatou-se que uma série de malhas apresentava grande potencial de melhora. Subseqüentemente, algumas malhas sofreram intervenção e o indicador baseado em variância mínima mostrou pequena variação à alteração de sintonia. Entretanto, os engenheiros afirmavam que os testes intrusivos mostravam visível melhora.

Comparando os resultados de dois períodos de dados, um antes e outro depois da melhora do controlador, utilizando como indicadores de desempenho o índice de Harris e a razão entre os tempos de subida entre a malha aberta e fechada ( $R_{tR}$ ). A Tabela 2 sumariza os resultados.

Verifica-se que o índice de Harris teve uma pequena variação, enquanto que o  $R_{tR}$  mostrou-se adequado para indicar a melhora do controle da malha.

**Tabela 2:** Comparação entre o índice de Harris e a razão entre os tempos de subida do sistema em malha aberta e fechada ( $R_{tR}$ ) para controlador industrial

Índice	Antes	Depois
Harris	0,281	0,404
$R_{tR}$	0,97	2,32

## 7. CONCLUSÕES

As principais conclusões acerca do presente trabalho podem ser sumarizadas em:

- Os benefícios de auditar o desempenho de controladores são evidentes. Estes são bem conhecidos pela indústria.
- Nos dias atuais a migração para o termo gerenciamento de controladores não significará apenas um novo nome, mas ferramentas e metodologias mais poderosas.
- A quantificação do desempenho e robustez de controladores apresenta avanços na direção de índices universais.
- A quantificação do impacto econômico de cada controlador também é possível.
- A avaliação da saúde do atuador também é possível de forma automática.

- Novas metodologias permitem também detectar distúrbios periódicos, sua causa e fonte.
- Algumas metodologias apresentadas foram aplicadas em um caso industrial, apresentando resultados muito bons.

## 8. REFERÊNCIAS

- BIALKOWSKI, W. L. (1993) Dreams versus reality: A view from both sides of the gap. *Pulp and Paper Canada*, 94, 19-27.
- Edgar, T. F. (2004). "Control and operations: when does controllability equal profitability? ." *Computers & Chemical Engineering* 29(1): 41-49
- ETTALEB, L., DAVIES, M. S., DUMONT, G. A. & KWOK, E. (1996) Monitoring oscillations in a multiloop system. *IEEE Conference on Control Applications - Proceedings*.
- FARENZENA, M. & TRIERWEILER, J. O. (2006) Quantifying closed-loop performance based on on-line performance indices. *ADCHEM 2006 Gramado / Brazil*.
- Farenzena, M. and J. O. Trierweiler (2006). Variability Matrix: a new tool to improve the plant performance. *ADCHEM 2006 Gramado/Brazil*.
- HARRIS, T. J. (1989) Assessment of control loop performance. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67, 856-861.
- HUANG, B., SHAH, S. L. & KWOK, E. K. (1997) Good, bad or optimal? Performance assessment of multivariable processes. *Automatica*, 33, 1175-1182.
- HYVARINEN, A. & OJA, E. (2000) Independent component analysis: algorithms and applications. *Neural Networks*, 13, 411-430.
- JELALI, M. (2006) An overview of control performance assessment technology and industrial applications. *Control Engineering Practice*, 14, 441-466.
- MUSKE, K. R. (2003) Estimating the economic benefit from Improved Process Control. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 4535-4544.
- PATWARDHAN, R. S. & SHAH, S. L. (2002) Issues in performance diagnostics of model-based controllers. *Journal of Process Control*, 12, 413-427.
- QIN, S. J. (1998) Control performance monitoring -- a review and assessment. *Computers & Chemical Engineering*, 23, 173-186.
- SEBORG, D. E., EDGAR, T. F. & MELLICHAMP, D. A. (2004) *Process dynamics and control*, Hoboken, NJ, Wiley.
- SHOUKAT CHOUDHURY, M. A. A., SHAH, S. L. & THORNHILL, N. F. (2004) Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics. *Automatica*, 40, 9.
- THORNHILL, N. F. & HAGGLUND, T. (1997) Detection and diagnosis of oscillation in control loops. *Control Engineering Practice*, 5, 1343-1354.
- THORNHILL, N. F., HUANG, B. & ZHANG, H. (2003) Detection of multiple oscillations in control loops. *Journal of Process Control*, 13, 91-100.
- THORNHILL, N. F. & HORCH, A. (2007) Advances and new directions in plant-wide disturbance detection and diagnosis. *Control Engineering Practice*, 15, 1196-1206.
- XIA, C., HOWELL, J. & THORNHILL, N. F. (2005) Detecting and isolating multiple plant-wide oscillations via spectral independent component analysis. *Automatica* 41.
- YAMASHITA, Y. (2006) An automatic method for detection of valve stiction in process control loops. *Control Engineering Practice*, 14, 503-510.