



Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

SINTONIA DE CONTROLADORES PID EM COLUNAS DE DESTILAÇÃO ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Maria Cristina Szpak Swiech, Elder Oroski, Lúcia Valéria Ramos de Arruda*

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)
Av. Sete de Setembro, 3165, 80230-901, Curitiba – PR.
Tel: (41) 310-4679, Fax: (41) 310-4683
*arruda@cpgei.cefetpr.br

Resumo – Este artigo apresenta uma metodologia para sintonia de controladores desacoplados PID aplicados em colunas de destilação através da utilização de algoritmos genéticos. Propõem-se a utilização de uma função de avaliação do algoritmo genético composta por três parcelas considerando os critérios ITSE e de variância mínima para os sinais de saída e de controle. Esta metodologia pode ser aplicada em diferentes processos na indústria petroquímica, mesmo aqueles que apresentam forte interação entre variáveis, como também ser adaptada para utilização em outros tipos de controladores. Para validação da metodologia, a proposta foi aplicada à coluna de destilação Wood-Berry.

Palavras-Chave: sintonia PID; algoritmos genéticos; sistema MIMO.

Abstract – This paper proposes the use of genetic algorithms to tuning decoupled PID controllers for distillation columns. We develop a new fitness function for genetic algorithm that considers both ITSE and minimum variance criteria. This architecture can be applied to different petrochemical process presenting non-linearities and strong interactions between its variables, and can be adapted to use with others kinds of controllers. The proposed approach were applied to Wood-Berry distillation column.

Keywords: PID tuning; genetic algorithms; MIMO system.

1. Introdução

A indústria petroquímica apresenta sistemas multimalha diagonais como configuração de controle básica em muitos de seus processos, pois o controle de várias malhas independentes é mais fácil de se implementar na prática, que um controle multivariável pleno, do tipo DMC (*Dynamic Matrix Control*) ou LQG (*Linear Quadratic Gaussian*).

Porém, o processo de ajuste dos vários controladores utilizados nesta configuração, pode se tornar difícil e demorado. Se, por exemplo, n controladores PID forem utilizados, haverá $3n$ parâmetros a ser sintonizados, e é comum se verificar na indústria que esta tarefa é feita através de exaustivos métodos de tentativa e erro (Luyben, 1990), que demandam tempo e muitas vezes são incapazes de atingir os critérios de melhor desempenho da planta.

A procura atual por uma maior eficiência nas diversas etapas de processo tem justificado o uso de procedimentos de melhoria nos principais pontos de uma planta. As técnicas de otimização baseadas em algoritmo genético (AG) têm se mostrado eficientes para problemas de ajuste de controladores em sistemas multivariáveis.

Este artigo apresenta uma metodologia automática de sintonia conjunta dos n controladores PID utilizados em processos petroquímicos multivariáveis através da utilização de algoritmos genéticos. A técnica proposta independe do número de entradas e saídas existentes no sistema, podendo ser adaptada e utilizada para diferentes arquiteturas.

Para esta sintonia conjunta de controladores, é proposto utilização de uma função de avaliação do algoritmo genético que alia diferentes critérios de desempenho baseados no erro quadrático e na variância mínima dos sinais de saída e de controle (Aström e Wittenmark, 1995). A otimização desta função de avaliação assegura bons resultados mesmo para sistemas fortemente acoplados.

O presente artigo é organizado da seguinte forma, a seção 2 apresenta as características gerais do controle multivariável sintonizado via algoritmo genético, a seção 3 apresenta a arquitetura proposta detalhando a função de avaliação a ser utilizada pelo algoritmo genético para sintonia dos controladores, a seção 4, apresenta os resultados obtidos no controle da coluna de destilação Wood-Berry, que é um caso de escola, e, finalmente, na seção 5 são descritos os comentários finais e conclusões.

2. Controle Multivariável

Os sistemas de controle na indústria de petróleo envolvem, em sua maioria, o controle de múltiplas variáveis de entrada e saída de processos. O controle desacoplado (Figura 1) é uma das estratégias mais utilizadas nestes tipos de plantas, em substituição à utilização de um único controlador multivariável (controlador multivariável pleno). Nesta estratégia, considera-se que o processo é composto por n saídas independentes que podem ser controladas por n controladores monovariáveis, o que nem sempre acontece na prática.

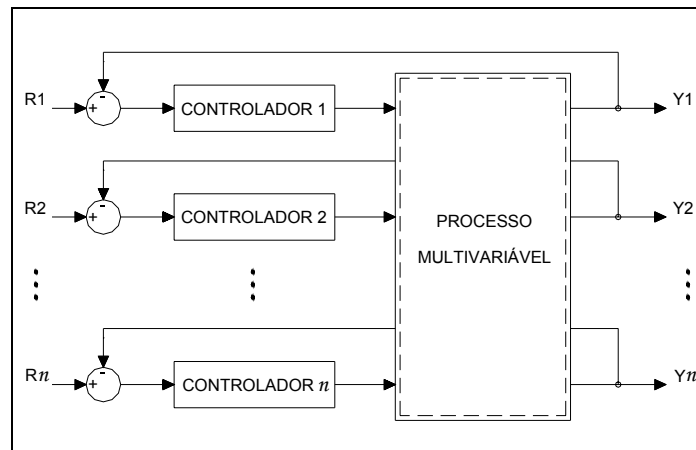


Figura 1. Arquitetura de controle multivariável desacoplado.

A sintonia dos n controladores não é tarefa trivial, pois podem ocorrer interações entre as malhas de controle, interferindo na visualização correta do comportamento de cada uma delas por parte do projetista. Portanto, a sistematização de metodologias para sintonia de todos os controladores em conjunto é importante para sistemas com estas características.

Para este objetivo, propõe-se neste artigo o uso da técnica de algoritmos genéticos (Holland, 1975) para a procura direta dos parâmetros de configuração de cada controlador empregado, de maneira simultânea.

Para a utilização desta metodologia existem dois principais passos a serem determinados.

Primeiramente é necessário efetuar a representação cromossômica (Michalewicz, 1996) dos parâmetros de todos os controladores a ser ajustados. Os parâmetros de configuração devem ser repassados corretamente para a rotina

utilizada pelo algoritmo genético, pois esta representação carrega os dados que são utilizados como variáveis de procura pelo AG.

A segunda determinação importante é a construção de uma função de avaliação (Michalewicz, 1996) capaz de verificar corretamente quais são os melhores conjuntos de parâmetros de sintonia dos controladores. A função de avaliação permite quantificar e comparar cada uma das soluções encontradas. Este é o critério utilizado para o direcionamento da busca pelo algoritmo genético.

O estabelecimento destas duas etapas principais interfere diretamente no desempenho da metodologia. Os parâmetros repassados para o algoritmo genético devem ser suficientes para a sintonia dos controladores utilizados, e a função de avaliação deve representar corretamente os objetivos de controle a ser alcançados.

Este artigo propõe o uso de algoritmos genéticos para evoluir os parâmetros K_p , K_i e K_d de controladores PID independentes, conforme Figura 2.

3. Arquitetura de Controle

O controle PID é um dos mais utilizados no meio industrial chegando a atingir 95% das malhas de controle (Åström e Hägglund, 1995), por isso ainda tem forte importância hoje, mesmo na presença de técnicas de controle mais modernas.

A ação proporcional atua diretamente sobre o ganho do sistema, a ação integral está ligada à melhoria da precisão da resposta e a ação derivativa antecipa o erro atuante e produz uma correção antecipada.

A arquitetura de controle desacoplado PID é composta por controladores independentes, inseridos no sistema como mostrado na Figura 2, para o caso de um sistema multivariável acoplado com duas entradas e duas saídas.

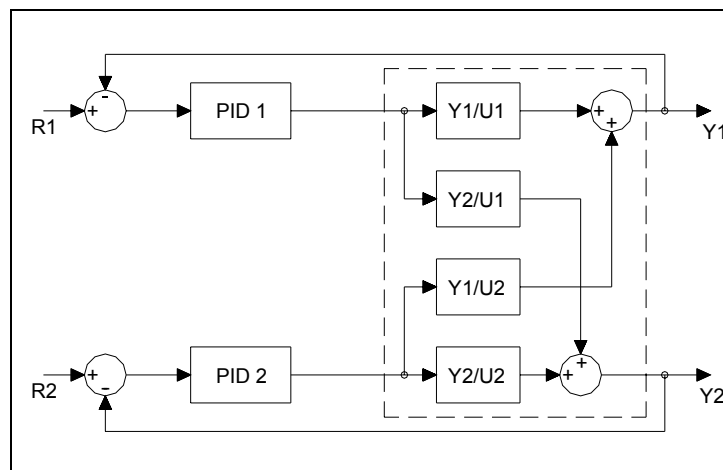


Figura 2. Arquitetura de controle desacoplado PID.

O processo de sintonia dos controladores PID foi feito diretamente pela busca de melhores valores para cada um dos parâmetros K_p , K_i e K_d de cada controlador através da utilização de algoritmos genéticos, em substituição aos métodos clássicos como *Ziegler Nichols* e *Biggest Log Modulus*.

3.1. Configurações do AG

A representação cromossômica dos parâmetros foi efetuada por ponto flutuante (Michalewicz, 1996) (Goldberg, 1989), na qual cada cromossomo é codificado como um vetor de números de pontos flutuantes de mesmo tamanho que o vetor solução e, cada parâmetro é forçado a se situar dentro de determinada faixa.

O nível de aptidão dos indivíduos foi avaliado a partir da minimização da seguinte função de avaliação:

$$f = [x * \int_{t_0}^{t_n} te^2(t)dt] + k_1 * [w * \sigma^2(e(t))] + k_2 * [y * \sigma^2(u(t))]$$

Na qual:

k_1, k_2 → fatores de escala;

e → erro (referência/saída do processo);

t → tempo;

$\sigma^2(e(t))$ → variância do erro $e(t)$;

$\sigma^2(u(t)) \rightarrow$ variância do sinal de controle $u(t)$;

$w, x, y \rightarrow$ fatores de ponderação com faixa entre [0 1] especificado pelo projetista.

Esta função de avaliação propõe a utilização do critério da Integral do Erro Quadrático Ponderado pelo Tempo (ITSE) em conjunto com critérios de variância mínima aplicados ao sinal de controle $u(t)$ e ao erro $e(t)$ do processo (Aström e Wittenmark, 1995).

A utilização do critério ITSE se justifica pelo fato de que quando aplicado para respostas ao degrau, possibilita uma penalização mais severa para os erros de estado estacionário, existindo assim uma garantia maior de estabilização do sistema sobre o valor de referência.

O segundo membro da função de avaliação objetiva diminuir oscilações que possam ocorrer na saída do sistema, a partir da minimização da variância observada no sinal erro $e(t)$ do processo.

O terceiro membro, que aplica a minimização da variância do sinal de controle $u(t)$, tem por objetivo possibilitar a procura por uma sintonia que gere sinais de controle mais estáveis.

Os fatores de escala k_1 e k_2 são necessários para situar os valores encontrados pelos membros 2 e 3 da função de avaliação na mesma casa decimal dos valores encontrados no primeiro membro. Este equilíbrio de amplitude entre os três membros da função é necessário para que nenhum critério se sobreponha, suprimindo a atuação dos demais. No momento do projeto, é necessária a observação das características das respostas do processo a ser controlado, para um correto dimensionamento destes fatores.

Os fatores de ponderação w, x e y possibilitam que o projetista possa exercer sua preferência de acordo com objetivos de controle distintos, atribuindo pesos diferenciados de acordo com a necessidade. Por exemplo, para grandes valores de y ou w em relação ao fator x , o resultado do algoritmo de busca favorece os indivíduos que possuem pouca ou nenhuma oscilação no sinal de saída, mas que podem apresentar algum erro de estado estacionário. Da mesma forma, para uma ponderação x maior que w e y , os indivíduos que possuam erro de estado estacionário constante serão mais rapidamente eliminados que indivíduos mais próximos ao valor de referência que possuam oscilações de pequena amplitude. Desta forma, dependendo das características do processo a ser controlado e do principal objetivo do projetista – diminuição do sobre-sinal, aumento da velocidade de resposta, diminuição do erro de estado estacionário, suavização do transitório – estes fatores podem ser estudados e utilizados como ferramenta auxiliar.

Para um processo com “ n ” saídas, a função de avaliação deve ser aplicada de forma independente para cada uma delas. O equilíbrio das respostas obtidas determina qual indivíduo apresenta o melhor desempenho, considerando todas as saídas simultaneamente. Assim, o conjunto de parâmetros de sintonia dos controladores é aquele que minimiza o seguinte critério de desempenho:

$$J = \sqrt{(f_1)^2 + (f_2)^2 + \dots + (f_i)^2 + \dots + (f_n)^2}$$

Sendo f_i o resultado da aplicação da função de avaliação à saída “ i ”.

4. Exemplo de Aplicação

Para exemplificar a metodologia proposta, foi utilizada a coluna de destilação Wood-Berry, que é um caso clássico de escola para simulação de um sistema multivariável que apresenta duas entradas e duas saídas.

Wood e Berry (1973) apresentaram as seguintes funções de transferência que descrevem o comportamento de uma coluna de destilação que separa metanol e água:

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-s}}{16,7s+1} & \frac{-18,9e^{-3s}}{21,0s+1} \\ \frac{6,6e^{-7s}}{10,9s+1} & \frac{-19,4e^{-3s}}{14,4s+1} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1(s) \\ x_2(s) \end{bmatrix}$$

As variáveis controladas são as composições dos produtos de topo e de fundo expressos em função da porcentagem mássica de metanol, e as entradas manipuladas são a vazão mássica de refluxo e a vazão mássica de vapor expressas em lb/min, considerando o minuto como unidade de tempo padrão.

Os valores de operação a serem atingidos são 96% de metanol no topo e 0,5% de metanol no fundo.

4.1. Aplicação do AG

Para este exemplo de aplicação, os valores dos fatores de ponderação da função de avaliação foram definidos como $w = 0.1$, $x = 0.1$ e $y = 0.9$, e os fatores de escala, $k_1 = 10$ e $k_2 = 100$.

Foi definida a utilização de cromossomos com 6 genes, que representam diretamente os parâmetros Ki_1 , Kp_1 , Kd_1 , do controlador 1 e, Ki_2 , Kp_2 , Kd_2 do controlador 2. Cada gene teve como alelos possíveis, números reais menores que 1, visto que em uma análise preliminar, ganhos maiores que este ocasionaram instabilidade no sistema.

Com relação aos parâmetros do algoritmo genético, o tamanho da população foi definido em 500 indivíduos, taxa de mutação de 0.05, e taxa de recombinação de 0.10. O método de seleção utilizado foi a roleta com elitismo de 1 indivíduo (Michalewicz, 1996) (Goldberg, 1989).

4.2. Resultados

Após 45 gerações foi possível observar o início do domínio do melhor indivíduo sobre a população. O cromossomo escolhido apresentou os seguintes valores de ganho:

$$\begin{aligned} Kp_1 &= 0,11238 \\ Kp_2 &= -0,12129 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ki_1 &= 0,024317 \\ Ki_2 &= -0,015808 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Kd_1 &= -0,0063924 \\ Kd_2 &= -0,13549 \end{aligned}$$

As curvas de respostas obtidas são apresentadas na Figura 3. O sistema apresentou erro de estado estacionário próximo de zero, tempo de acomodação de aproximadamente 40 unidades para y_1 e 30 para y_2 , e sobre-elevação de 40% para y_2 .

Com o objetivo de verificar o desempenho do sistema para diferentes requisitos, os valores de referência foram alterados para 0.8 para saída y_1 e 0.2 para saída y_2 . As curvas obtidas podem ser observadas na Figura 4.

Os resultados obtidos com a mudança dos valores de referência não diferem dos anteriores. Os valores de erro de estado estacionário, sobre-elevação e tempo de acomodação são praticamente os mesmos, demonstrando que o sistema de controle pode atuar em diferentes condições.

Para verificar o comportamento do sistema de controle frente a perturbações, foi aplicado um sinal do tipo rampa de magnitude 0,3 no tempo de 150 minutos na saída y_1 do processo. Os resultados podem ser observados na Figura 5.

A perturbação inserida foi compensada pelo sistema de controle em poucas unidades de tempo, o que demonstra que a configuração utilizada é robusta a este tipo de perturbação.

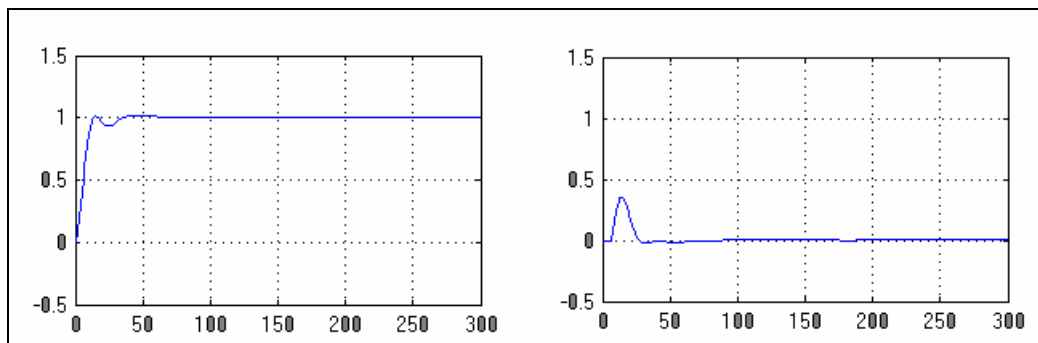


Figura 3. Respostas obtidas y_1 , y_2 , valores de referência de 1 para y_1 e de 0 para y_2 .

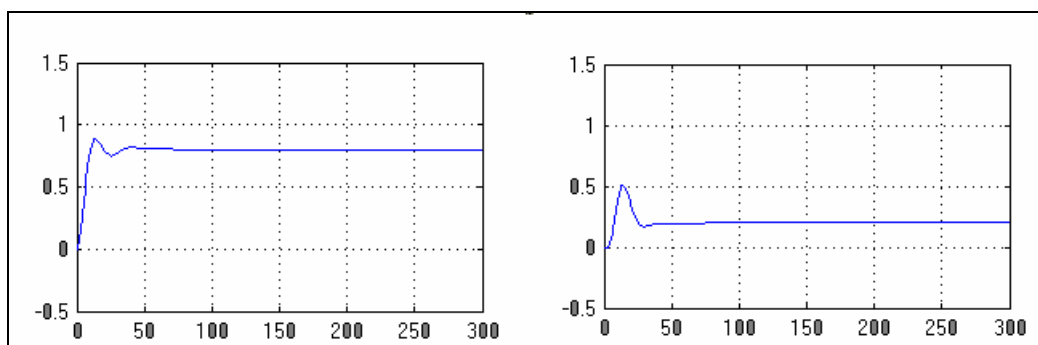


Figura 4. Respostas obtidas y_1 , y_2 , valores de referência de 0,8 para y_1 e de 0.2 para y_2 .

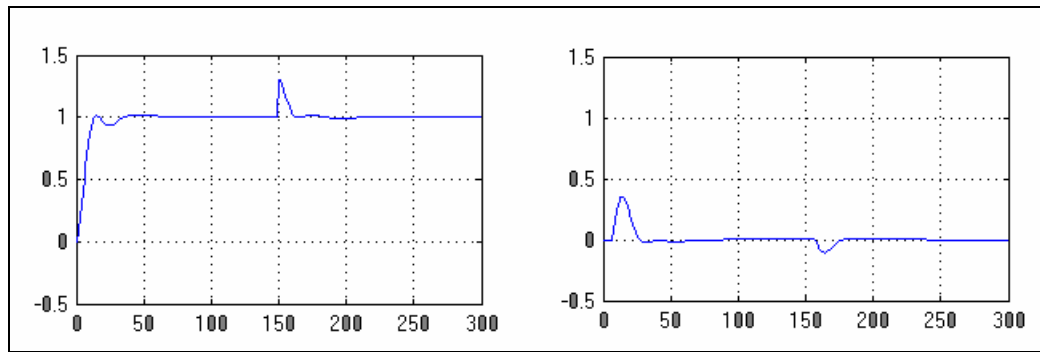


Figura 5. Respostas obtidas y_1 , y_2 , perturbação tipo rampa.

Conforme citado anteriormente, a metodologia apresentada pode ser adaptada para diferentes tipos de processos petroquímicos, independente do número de entradas e saídas existentes.

8. Considerações Finais

A sintonia de diversos controladores constitui um desafio aos engenheiros de processo e operadores uma vez que ela depende de um completo conhecimento das plantas que são muitas vezes complexas, e que podem possuir variáveis com fortes interações entre si, além de não linearidades e de objetivos de controle conflitantes.

Este artigo apresentou uma proposta de sintonia de controladores PID desacoplados para sistemas petroquímicos multivariáveis através do uso de algoritmos genéticos.

A maior vantagem desta metodologia é que um sistema de controle multivariável, controlado através de várias malhas independentes, pode ter todos seus controladores ajustados de forma unificada.

Os resultados apresentados neste artigo demonstram que os algoritmos genéticos são eficientes para sintonia de controladores PID utilizados neste tipo de arquitetura.

9. Agradecimentos

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP - e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-CEFET-PR).

10. Referências

- ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America, North Carolina, 1995.
- ASTRÖM K. J., WITTENMARK, B. *Adaptive Control*. 2nd ed. USA: Addison – Wesley, 1995.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Adison-Wesley. Ann Arbor, 1989.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- LUYBEN, W. L. *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*. 2nd edition, McGraw Hill, New York, USA, 1990.
- MICHALEWICZ, Z. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. 3. ed. Springer-Verlag, New York, 1996.
- WOOD, R. K. BERRY, M. W. *Terminal composition of a binary distillation column*. Chemical. Engineering Sciences, Vol. 28, pp. 1707-1717, 1973.