



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

CONTROLADOR GPC ADAPTATIVO APLICADO EM UNIDADES FCC

Wilson S. Melo Jr., Luiz Carlos A. Rodrigues, L. Valéria R. Arruda, Flávio Neves Jr.

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Av. Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-901, Curitiba – PR
[melo, lcar, arruda, neves]@cpgei.cefetpr.br

Resumo – Este artigo trata de uma proposta de implementação de um controlador preditivo para aplicação em controle de conversores FCC. O controlador baseia-se no algoritmo GPC (*Generalized Predictive Control*) e utiliza um modelo adaptativo gerado por identificação em tempo real, usando o algoritmo RLS (*Recursive Least Squares*). Um modelo de equações de um conversor Kellogg Orthoflow F é usado para implementação. Em uma unidade FCC, as principais reações ocorrem no *riser*, e existem dois estágios de regeneração. O controlador é regulado para duas variáveis manipuladas e duas controladas. As variáveis manipuladas são a vazão de catalisador regenerado na base do *riser* e a vazão de ar de combustão no regenerador. As variáveis controladas, por sua vez, correspondem à temperatura do *riser* e à temperatura do segundo estágio do regenerador. O desempenho do controlador é avaliado em simulação, e os resultados obtidos comprovam a viabilidade da técnica.

Palavras-Chave: Controle preditivo, identificação, craqueamento catalítico.

Abstract – This paper presents a predictive controller implementation applied on FCC unit. It is based on GPC (*Generalized Predictive Control*) algorithm and uses an adaptive model generated by real time identification using RLS (*Recursive Least Squares*) algorithm. A Kellogg Orthoflow F unit model is used to validate this implementation. In a FCC unit, the main reactions happen in riser and there are two regeneration stages. The controller is tuning to two manipulated variables and two controlled variables. The manipulated variables are the regenerated catalytic flow and the airflow rate to regenerator. The controlled variables are the riser temperature and the second stage regenerator temperature. The controller performance is evaluated by simulation and the obtained results assert the applicability of the proposed approach.

Keywords: Predictive control, identification, catalytic cracking.

1. Introdução

O FCC (*Fluid Catalytic Cracking*) é um processo largamente empregado dentro da indústria petroquímica, sendo responsável pela conversão de hidrocarbonetos pesados em frações mais leves, de maior valor comercial (Abadie, 1997). Sua concepção desenvolveu-se de forma notável nos últimos cinquenta anos (King, 1996), tornando-o um processo imprescindível a uma refinaria moderna. Para isso, dois aspectos são determinantes:

- Aspecto técnico: um conversor FCC contribui para que uma refinaria ajuste sua produção às reais necessidades de mercado (Moro, 1992).
- Aspecto econômico: a transformação de frações residuais de petróleo em produtos de alto valor comercial resulta em um maior lucro para a indústria (King, 1996).

O controle de um conversor FCC é uma tarefa reconhecidamente difícil, uma vez que o craqueamento catalítico apresenta muitas variáveis, com forte interação entre elas. O processo caracteriza-se por um estado estacionário altamente não linear, com variáveis de fase não-mínima e grandes constantes de atraso. Existem também severas restrições a serem consideradas, desde objetivos econômicos até a resistência dos equipamentos (Moro e Odloak, 1995).

Nas últimas décadas, controladores preditivos têm sido vistos como uma das mais importantes classes de algoritmos para controle avançado de processos, especialmente processos químicos. Estes controladores podem atuar eficientemente sobre sistemas instáveis em malha aberta e sistemas de fase não-mínima, apresentando características desejáveis de estabilidade (Soeterboek, 1990). Trabalhos envolvendo a aplicação de controladores preditivos em unidades FCC são apresentados por Moro e Odloak (1992), Santos *et al.* (2000) e Zanin *et al.* (2000).

A tarefa de projetar um controlador preditivo pode ser subdividida em duas etapas principais. A primeira diz respeito à identificação de um modelo que represente o comportamento do processo real. A segunda está vinculada à aplicação de um algoritmo de controle preditivo. Este determina as ações de controle com base na minimização de uma função de custo, considerando-se futuras respostas preditas pelo modelo do processo (Soeterboek, 1990).

Dentre os algoritmos de controle preditivo mais conhecidos, o GPC (*Generalized Predictive Control*) tem recebido particular atenção por possuir aplicação geral e condições de estabilidade bem conhecidas. Referências à aplicação de controladores GPC em processos industriais podem ser encontradas em Clarke *et al.* (1987), Espinosa e Vandewalle (1998) e Hapoglu *et al.* (2001).

Modelos adaptativos desempenham uma importante função no desenvolvimento de tecnologias que empregam controle preditivo. Geralmente, modelos dinâmicos utilizados como preditores são obtidos a partir de identificação *black-box off-line*. No contexto industrial, a identificação destes modelos envolve um alto custo, em virtude de fatores tais como o tempo requerido e a dificuldade de se efetuar testes sobre unidades industriais. Assim, é cada vez maior a busca por estratégias de identificação que permitam contornar as dificuldades acima apresentadas, e ao mesmo tempo aprimorar a aplicação de novas tecnologias (Zhu e Butoyi, 2002).

Este artigo apresenta a implementação de um controlador GPC adaptativo para aplicação em conversores FCC. O controlador é aplicado sobre um modelo de equações proposto por Moro (1992) para um conversor Kellogg Orthoflow F., e utiliza um modelo auto-regressivo gerado em tempo real, usando o algoritmo RLS (*Recursive Least Squares*). Este trabalho está organizado em cinco seções. Após esta introdução, a segunda seção descreve de forma sucinta o processo a ser controlado. A estratégia de controle desenvolvida é apresentada na terceira seção. Em seguida, são descritos os resultados obtidos e por fim as conclusões decorrentes dos mesmos.

2. O Modelo do Processo

O desempenho do controlador preditivo é analisado por meio de simulação, usando-se um modelo estático não linear de um conversor Kellogg Orthoflow F., proposto por Moro (1992). Este tem sido empregado também na implementação de outros trabalhos de pesquisa envolvendo controle de conversores FCC, como Moro e Odloak (1995), Santos *et al.* (2000) e Zanin *et al.* (2000). O modelo basicamente contempla os balanços de massa e energia no conjunto reator/regenerador, bem como as cinéticas das reações de craqueamento e formação de coque. Neste modelo de unidade, as reações de craqueamento ocorrem no *riser*, e têm-se dois estágios de regeneração. As principais variáveis inferidas pelo modelo são:

- Quantidade de coque acumulado sobre o catalisador consumido, bem como sobre o catalisador regenerado em ambos os estágios do regenerador;
- Temperatura do *riser*;
- Temperatura da fase densa do regenerador em ambos os estágios;
- Inventário de catalisador do reator e regenerador em ambos os estágios;
- Temperaturas da fase diluída do regenerador e ciclones;
- Quantidade de oxigênio do fluxo de gás no regenerador;
- Pressão no reator e regenerador.

Moro e Odloak (1995) sugerem que, para este modelo de processo, as duas variáveis manipuladas mais importantes são a vazão de catalisador regenerado para o *riser*, determinada pela válvula TCV, e a vazão de ar de combustão injetado no leito do regenerador. Estas variáveis possuem grande influência sobre as temperaturas do *riser* e regenerador, que por sua vez são as variáveis controladas de maior interesse no processo. Isso ocorre porque alterações

nas temperaturas de reação e regeneração da unidade irão influenciar diretamente as taxas de rendimento dos produtos (Abadie, 1997).

3. Controle Preditivo Generalizado Adaptativo

3.1. Predição da resposta do processo

O algoritmo GPC (*Generalized Predictive Control*) parte do princípio que um modelo CARIMA (*Controlled AutoRegressive with Integrated Moving Average*) do processo esteja disponível para predição do mesmo. Sejam A, B, E e F polinômios auto-regressivos sob o operador q^{-1} , onde A e B descrevem o modelo do processo e E e F são obtidos pela solução de duas identidades Diophantinas sobre A e B (Clarke *et al.*, 1987), tem-se que a predição da resposta do processo para um instante $k + j$, com $j \geq 1$, é dada pela equação (1). Os valores de E e F podem ser determinados de forma recorrente, utilizando-se as equações (2).

$$y'(k + j) = E_j B \Delta u(k + j - 1) + F_j y(k) \quad (1)$$

$$E_0 = 1; E_{j+1} = E_j + q^{-j} f_0; F_0 = q(1 - \Delta A); F_{j+1} = (F - A \Delta f_0) / q^{-1} \quad (2)$$

onde $\Delta = 1 - q^{-1}$ é um operador de diferenciação.

3.2. Identificação do modelo de predição

Para se implementar o controlador GPC multivariável, é necessária a identificação de um modelo CARIMA para predição do processo. Um modelo auto-regressivo multivariável com m entradas e n saídas pode ser descrito como:

$$AY = BU \quad (3)$$

Onde:

$$A = \begin{bmatrix} A_1(q^{-1}) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2(q^{-1}) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_n(q^{-1}) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_{11}(q^{-1}) & B_{12}(q^{-1}) & \dots & B_{1m}(q^{-1}) \\ B_{21}(q^{-1}) & B_{22}(q^{-1}) & \dots & B_{2m}(q^{-1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n1}(q^{-1}) & B_{n2}(q^{-1}) & \dots & B_{nm}(q^{-1}) \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ \vdots \\ y_n(k) \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} u_1(k-1) \\ u_2(k-1) \\ \vdots \\ u_m(k-1) \end{bmatrix}$$

Na prática, a identificação consiste em determinar-se n modelos auto-regressivos, de modo que cada modelo corresponda à representação de uma das variáveis de saída. Assim, o p -ésimo modelo correspondente à $y_p(k)$ é dado por:

$$y_p(k) = -A_p(q^{-1})y_p(k-1) + B_{p1}(q^{-1})u_1(k-1) + \dots + B_{pm}(q^{-1})u_m(k-1) \quad (4)$$

Uma das principais dificuldades relacionadas à aplicação do GPC no controle de conversores FCC é a identificação de um modelo CARIMA. Uma vez que as inter-relações entre as variáveis são extremamente complexas, é muito difícil obter um modelo linear suficientemente representativo. Uma estratégia aplicável consiste em identificar o processo com um algoritmo RLS (*Recursive Least Squares*) em tempo real, usando fator de esquecimento variável. Com isso, os últimos dados têm maior relevância na determinação dos parâmetros do modelo. O processo é aproximado por um modelo linear dentro de um determinado espaço de tempo, para o qual este é suficientemente representativo. Um melhor desempenho pode ser obtido variando-se o fator de esquecimento exponencialmente ou utilizando-se o traço da matriz de covariância do RLS (Söderström e Stoica, 1989).

3.3. Lei de Controle

Dado o modelo representado pela equação (4), o problema do GPC consiste em minimizar uma função de custo que considera o erro de resposta predito pelo modelo dentro de um horizonte de predição H_p com relação a uma referência w , e o esforço de controle Δu aplicado dentro do horizonte de controle H_m (Clarke *et al.*, 1987). Essa função em sua versão multivariável é dada por:

$$J = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{H_p} \|y_j'(k+m|k) - w(k+m|k)\|^2 + \lambda \sum_{l=1}^M \sum_{n=1}^{H_m} \|\Delta u_l(k+n-1|k)\|^2 \quad (5)$$

A lei de controle do GPC multivariável é obtida determinando-se o esforço de controle Δu_i de modo que J seja mínima. A minimização da função de custo J pode ser obtida igualando-se $\frac{\partial J}{\partial \Delta u}$ a zero (Clarke *et al.*, 1987). Assim:

$$\Delta U = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (W - Y') \quad (6)$$

Onde:

$$G = \begin{bmatrix} G_1^1 & G_1^2 & \dots & G_1^M \\ G_2^1 & G_2^2 & \dots & G_2^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_N^1 & G_N^2 & \dots & G_N^M \end{bmatrix} \quad \Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u_1(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u_1(k+H_m|k) \\ \vdots \\ \Delta u_M(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u_M(k+H_m|k) \end{bmatrix} \quad Y' = \begin{bmatrix} y_1'(k+1|k) \\ \vdots \\ y_1'(k+H_p|k) \\ \vdots \\ y_N'(k+1|k) \\ \vdots \\ y_N'(k+H_p|k) \end{bmatrix}$$

Cada elemento da matriz G é também uma matriz, de ordem $H_p \times H_m$, e pode ser interpretado como a resposta da j -ésima saída do modelo a um degrau aplicado na l -ésima entrada, para cada passo de predição $k+m-1$ (Espinosa e Vandewalle, 1998).

4. Resultados

Os resultados a seguir apresentam o desempenho do controlador preditivo dentro de um regime operacional específico do processo, dado por Moro e Odloak (1995) e Zanin *et. al.* (2000). A seguinte condição é simulada. As temperaturas do *riser* e do segundo estágio do regenerador devem ser mantidas dentro de uma trajetória de referência (*setpoint*). Inicialmente, as temperaturas são conduzidas aos valores 542°C e 700°C, respectivamente. Aos 25 minutos, os valores de temperatura devem ser elevados para 544°C e 702°. Após 80 minutos, os valores são novamente incrementados, atingindo então 545°C e 704°C. Por fim, aos 120 minutos, o valor do diferencial de pressão regenerador/reator é modificado de 0.65Kg/cm² para 0.7Kg/cm², simulando uma perturbação no processo.

As variáveis manipuladas são a vazão de catalisador regenerado na base do *riser* e a vazão de ar de combustão injetado no leito do regenerador. A dinâmica de variação da primeira variável é determinada pela abertura da válvula TCV, sobre a qual o controle deve literalmente atuar. A válvula para injeção de ar de combustão não é contemplada no modelo. Desse modo, por praticidade, considera-se a atuação do controlador diretamente sobre esta variável, utilizando-se apenas uma normalização linear.

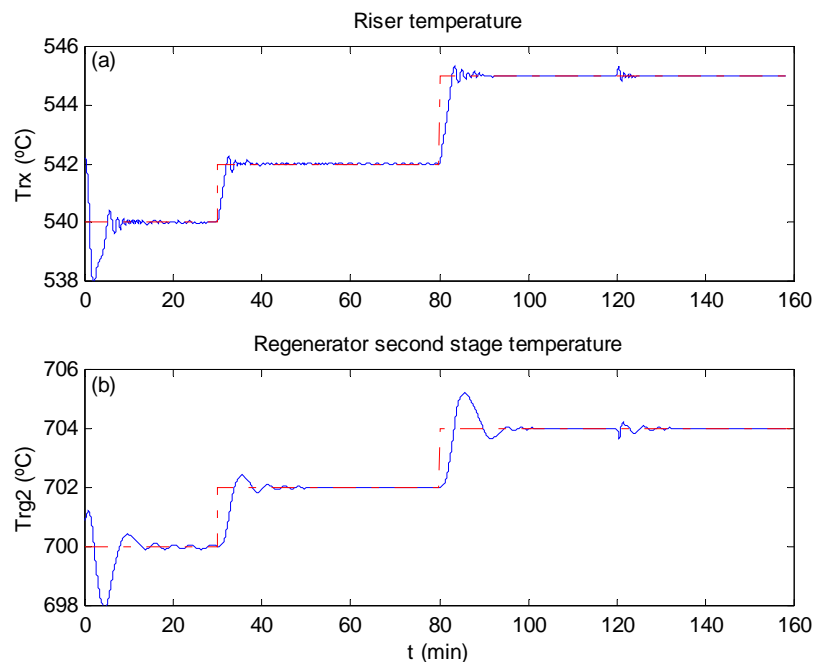


Figura 1: Variáveis controladas

A Figura 1 mostra as variações nas temperaturas do *riser* (T_{rx}) e segundo estágio do regenerador (T_{rg2}). Observa-se que o sinal controlado segue a trajetória de referência de modo satisfatório, apresentando um bom tempo de resposta, considerando-se as constantes de atraso do sistema. A variável T_{rg2} apresenta um comportamento mais suave que a variável T_{rx} , que por sua vez é mais susceptível à manipulação das variáveis controladas e perturbações.

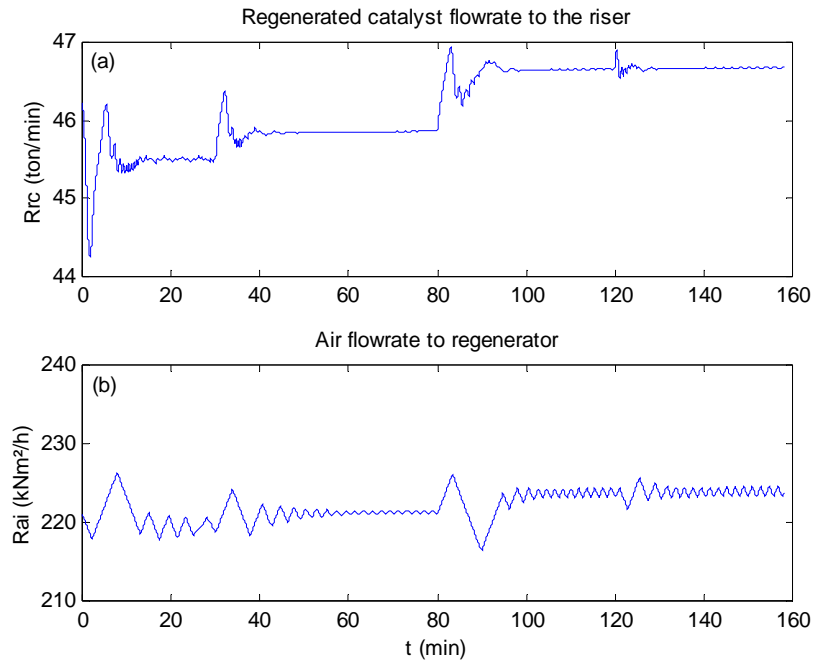


Figura 2: Variáveis manipuladas

A Figura 2 mostra o comportamento das variáveis manipuladas pelo controlador preditivo. Pode-se observar que a vazão de catalisador regenerado na base do *riser* (R_{rc}) é mantida dentro de um regime de operação estável, apresentando oscilações apenas nos instantes de mudança de *setpoint*. A vazão de ar de combustão no regenerador (R_{ai}) também é mantida dentro de uma faixa aceitável de variação. Todavia, seu comportamento apresenta-se levemente oscilatório em virtude do modelo não contemplar a modelagem de uma válvula para manipulação desta variável.

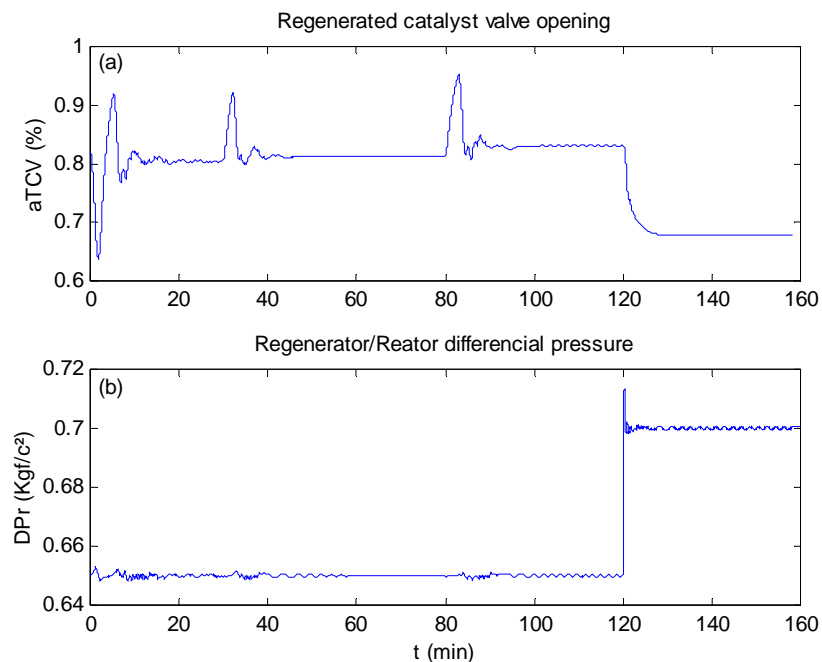


Figura 3: Válvula TCV e diferencial de pressão regenerador/reactor

A Figura 3 mostra as alterações nos valores da válvula de injeção de catalisador regenerado na base do *riser* (TCV) e o diferencial de pressão regenerador/reactor (D_{pr}). Pode-se observar que a abertura da válvula TCV é mantida dentro de um regime aceitável, sendo modificada de forma mais brusca a cada mudança de *setpoint* e posteriormente quando o valor de D_{pr} é incrementado. Na prática, o regime da válvula é alterado a fim de manter as temperaturas controladas em seus respectivos *setpoints*, mesmo sob condições de pressão distintas.

5. Conclusão

Este artigo considerou a aplicação de um controlador preditivo multivariável tipo GPC a um conversor FCC. O controlador faz uso de um modelo auto-regressivo multivariável, gerado por identificação adaptativa em tempo real.

O algoritmo de controle preditivo mostra-se capaz de controlar as temperaturas do *riser* e do segundo estágio do regenerador de forma eficiente, atuando sobre as vazões de catalisador regenerado e ar de combustão no regenerador. As variáveis controladas são de grande relevância para o processo, uma vez que influem diretamente nos percentuais de rendimento dos produtos de craqueamento.

Até o presente momento, não se encontrou registro de trabalhos aplicando controladores GPC em um conversor FCC. Entretanto, os resultados apresentados neste artigo indicam que esta aplicação é viável, e passível de estudos e análises mais profundos.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o 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).

7. Referências

- ABADIE, E., Craqueamento Catalítico, SEREC/CEN-SUD/PETROBRAS, 1997.
- CLARKE, D.W. MOHTADI, C., TUFFS, P.S., Generalized Predictive Control – Parts I and II, *Automatica*, Vol. 23, No. 2, 137-148, 1987.
- ESPINOSA, J., VANDEWALLE, J., Predictive Control Using Fuzzy Models, Accepted for publication in *Advances in Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing*, 1998.
- HAPOGLU, H., KARACAN, S., ERTEN KOCA, Z.S., ALPBAZ, M., Parametric and nonparametric model based control of a packed distillation column, *Chemical Engineering And Processing* 40, issue 6, 537-544, 2001.
- KING, D., *Engineering of Fluidized Catalytic Crackers*, Chevron Research and Technology Company, Richmond., 1996.
- MORO, L.F., Desenvolvimento de um Controlador Preditivo Multivariável para um Conversor Industrial de Craqueamento Catalítico, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1992.
- MORO, L.F., ODLOAK, D., Constrained multivariable control of fluid catalytic cracking converters”, *Journal of Process Control* 5, issue 1, 29-39, 1995.
- SANTOS, V.M.L., CARVALHO, F.R., SOUZA JR., M.B., Predictive Control based on Neural Networks: an application to a Fluid Catalytic Cracking Industrial Unit, *Brazilian Journal Of Chemical Engineering* 17, 4-7, 2000.
- SÖDERSTRÖM, T., STOICA, P., “System Identification”, Prentice Hall, New York, 1989.
- SOETERBOEK, A.R., “Predictive Control: a unified approach”, Ph.D. Tesis, Technische Universiteit Delft, 1990.
- ZANIN, A.C., TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M., ODLOAK, D., Industrial Implementation of a real-time optimization strategy for maximizing production of LPG in a FCC unit, *Computers And Chemical Engineering* 24, 525-531, 2000.
- ZHU, Y., BUTOYI, F., Case studies on closed-loop identification for MPC, *Control Engineering Practice*, 10, 403-417, 2002.