

CONTROLADORES DE ELEVADA ORDEM (CEO) PARA O CONTROLE ATIVO DE GOLFADAS EM POÇOS DE PETRÓLEO

Jorge O. TRIERWEILER¹, Marcelo FARENZENA¹ e Fabio C. DIEHL²

¹Grupo de Intensificação, Modelagem, Simulação,
Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP) / Departamento de Engenharia Química
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

²CENPES / Petrobras – E-mail para contato: Jorge.Trierweiler@ufrgs.br

RESUMO – A produção de petróleo e gás é caracterizada por complexos fenômenos de escoamento multifásico em longas tubulações, principalmente quando o ambiente de produção é marítimo. Esta combinação de cenários pode induzir o surgimento de padrões cíclicos de oscilação de pressão-vazão no escoamento do poço chamadas de golfadas. Aqui para resolver esse problema se está propondo a utilização de controladores de elevada ordem (CEO). Através do método da síntese direta se desenvolveu uma sistemática para o projeto do CEO com dois graus de liberdade, o que é fundamental para poder se lidar com plantas altamente subamortecidas. O método proposto é de fácil ajuste baseado no desempenho especificado pelo tempo de assentamento e grau de oscilação da malha fechada desejados. O desempenho robusto da solução proposta foi testado através da simulação com modelo rigoroso, visando controlar as golfadas incluindo a quantificação da válvula de controle. O CEO apresentou ações de controle mais suaves e efetivas, muito superiores as apresentadas pelo PI.

1 INTRODUÇÃO

Poços produtores de petróleo podem apresentar golfadas no escoamento do reservatório até a planta de processamento. Este fenômeno é caracterizado pela propagação de ondas de pressão que causam perdas estimadas em mais de 1 milhão de barris de óleo por ano no Brasil (cerca de R\$ 1 bilhão de reais a cada 2 anos) (DIEHL, 2022). O controle ativo de golfadas é uma solução promissora para atenuação das golfadas e o aumento da produção, entretanto dado ao comportamento fortemente subamortecido (oscilatório) das golfadas de alguns poços, controladores PID podem não apresentar o desempenho robusto requerido em aplicações reais. Controladores de elevada ordem (CEO) propostos neste trabalho são uma alternativa promissora para resolver esse problema.

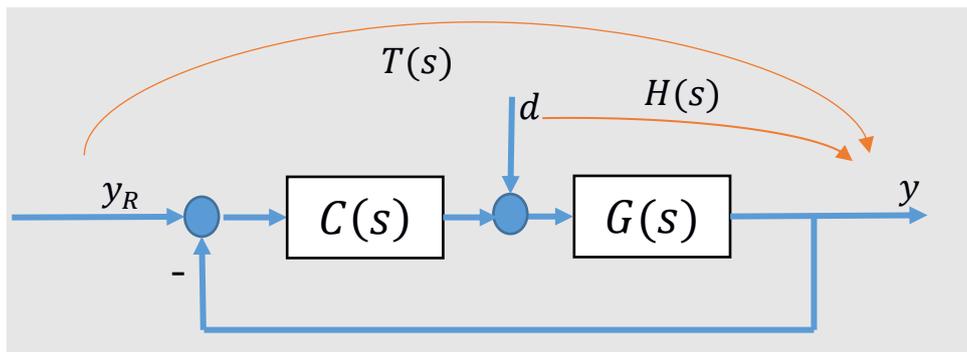
Considerando a representação padrão de uma malha de controle com retroalimentação, mostrada na Figura 1, onde $C(s)$ representa o controlador e $G(s)$, o processo a ser controlado, a respectiva função de transferência em malha fechada, $T(s)$, é dada por:

$$T(s) = \frac{y}{y_R} = \frac{G(s) \cdot C(s)}{1 + G(s) \cdot C(s)} \quad (1)$$

Supondo-se que se tenha o modelo da planta $G(s)$ e o desempenho alcançável $T(s)$ se poderá, através da colocação em evidência do controlador $C(s)$ se determinar a expressão do controlador capaz de levar a planta para comportamento desejado em malha fechada. A expressão para esse controlador é dada por:

$$C(s) = \frac{1}{G(s)} \cdot \frac{T(s)}{1-T(s)} \quad (2)$$

Figura 1: Malha de controle com retroalimentação clássica.

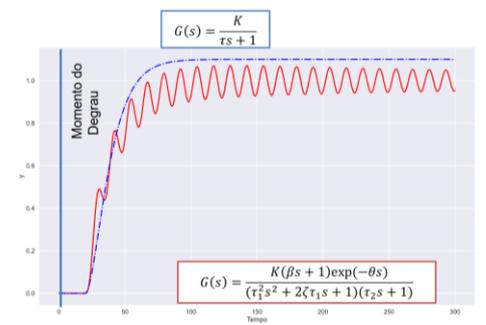
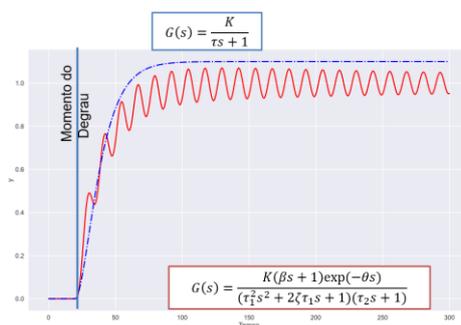
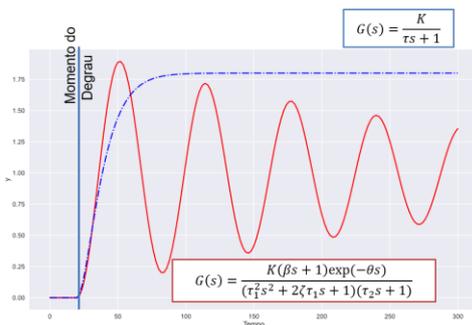


Desta forma, o controlador poderia assumir qualquer configuração, dependendo do modelo do processo considerado e do desempenho desejado em malha fechada. Contudo, controladores com estrutura fixa de baixa ordem (do tipo PID), são preferidos no projeto de sistemas de controle por razões óbvias: são mais fáceis de entender, explicar e implementar, demandam de menor esforço computacional, possuem boa confiabilidade e estão amplamente difundidos no meio industrial.

Figura 2: Caso em que um controlador PI poderá dar um resultado aceitável.

Figura 3: Situação em que o comportamento inicial já apresenta uma oscilação.

Figura 4: Situação em que o tempo morto limita a velocidade da malha fechada.



Um controlador PID pode ser visto como sendo um controlador de segunda ordem, que irá funcionar bem para plantas cuja dinâmica poderá ser capturada adequadamente por uma função de transferência de segunda-ordem. Já um controlador PI irá funcionar bem quando o comportamento dinâmico, na região onde a malha de controle irá de fato trabalhar puder ser representado adequadamente por uma FT de primeira ordem. A Figura 2 apresenta a situação em que uma FT de 1ª ordem é capaz de capturar o comportamento inicial de uma FT de 3ª ordem altamente subamortecida representado pela linha cheia em vermelho. Se a malha puder

ser rápida, o início da resposta será a região mais importante para ser capturada e, como se pode ver através da linha tracejada, um controlador PI poderá produzir um resultado aceitável às custas de ações de controle agressivas. Já na Figura 3, dada a dinâmica inicial da resposta ser mais rica, a aproximação inicial já não irá apresentar um resultado satisfatório, piorando ainda a situação quando se adiciona um tempo morto à resposta como ilustrado na Figura 4.

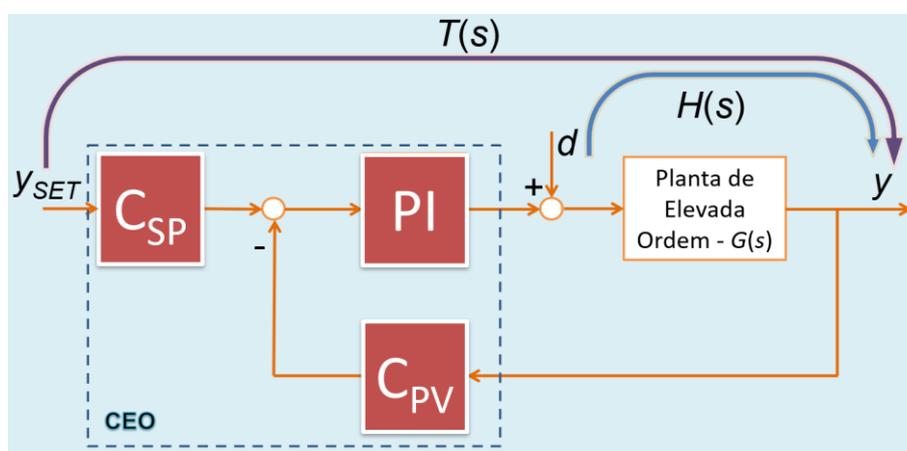
2 METODOLOGIA

2.1 Estrutura da malha de controle

A implementação de um controlador de elevada ordem, para que tenha sucesso na prática, deve ser realizado como ilustrado na figura 5, onde o CEO é decomposto em três blocos: filtro setpoint (C_{SP}), filtro na variável de processo (C_{PV}) e controlador PI. Esta decomposição nesses blocos apresenta as seguintes vantagens:

- **Bloco PI :** para ter implementação capaz de lidar corretamente com saturação das variáveis manipuladas, tendo uma devida ação *anti-windup*, a qual é crucial para qualquer aplicação industrial. Adicionalmente há a possibilidade de se fazer reajustes finos durante a operação normal através de alterações nos valores de ganho e constante de integração, além de se ter o ganho disponível para se implementar uma estratégia de ganho variável (*gainscheduling*).
- **Bloco C_{SP} :** representa o pré-filtro associado a mudança de setpoint. Na próxima seção se apresentará o método baseado no método da síntese direta, no qual se especificará o desempenho desejável para a malha fechada, ilustrado como $T(s)$ na Figura 5. O primeiro passo da metodologia proposta consiste em se determinar a expressão para o CEO, depois fatorá-la na expressão para $C_{SP}(s)$ e $PI(s)$.
- **Bloco C_{PV} :** este é o filtro da variável de processo e durante o projeto será escolhido de forma a se atingir o $H(s)$ compatível com a especificação desejada para $T(s)$ especificado para o projeto de $C_{SP}(s)$. Além disso de garantir essa compatibilidade, $C_{PV}(s)$ pode incluir filtros para redução do ruído, os quais podem inclusive ser operados com uma taxa de amostragem diferente visando reduzir o impacto dos ruídos de medição na qualidade do controlador.

Figura 5: Estrutura para implementar na prática um controlador de elevada ordem.



2.2 Especificação do desempenho desejado em malha fechada

Um fator de suma importância para o sucesso do método proposto é a função desempenho alcançável, pois ela representa o comportamento desejado para o sistema em malha fechada. Ela poderia ser uma função de transferência de primeira ou segunda ordem, especificando informações de interesse, como tempo de subida, tempo de assentamento, máxima sobre-elevação, entre outras. No entanto, ela deve ser compatível com o modelo do processo (tanto a ordem, como a dinâmica), e normalmente é desejável que a dinâmica em malha fechada se torne mais rápida que a dinâmica em malha aberta.

Além disso, algumas características são também necessárias: a função deve ser estável, deve apresentar ganho unitário (o que equivale a não apresentar erro em regime estacionário), deve convergir rapidamente para o valor estacionário, não apresentar sobre-elevação muito pronunciada e ser robusta. Em suma, ela deve representar de forma simples e precisa o comportamento esperado para o sistema em malha fechada.

Uma das formas que se pode utilizar como referência são as funções de transferência cujos coeficientes foram otimizados com relação ao critério ITAE para respostas a mudanças no valor da variável de referência. Estas funções se mostraram bastante apropriadas para serem utilizadas como padrões para a função desempenho alcançável, pois além de apresentarem todas as características desejadas citadas, possuem como parâmetro de ajuste o tempo de assentamento 5%, (T_A) e sobressinal menor ou igual a 5%. Através da escolha desse valor, se pode facilmente selecionar a dinâmica desejada. A especificação da resposta em malha fechada segue o seguinte padrão:

$$T_m(s) = \frac{1}{DEN_m(s)} = \frac{1}{p_m T_A^m s^m + p_{m-1} T_A^{m-1} s^{m-1} + p_{m-2} T_A^{m-2} s^{m-2} + \dots + p_2 T_A^2 s^2 + p_1 T_A s + 1} \quad (3)$$

onde m representa a ordem da resposta e T_A o tempo de assentamento 5% desejado. A ordem m a ser escolhida deverá ser igual a diferença de ordem do denominador e numerador da função de transferência do modelo da planta $G(s)$. A Tabela 1 apresenta os denominadores de (3) correspondente as ordens de 1 a 5.

Tabela 1: Denominadores de $T_m(s)$ da equação (3), $DEN_m(s)$, para diferentes ordens baseadas no critério ITAE em resposta a uma entrada do tipo degrau unitário. Modificado a partir de D'AZZO e HOUPIS (1978).

$0.3337783712 T_A s + 1$
$0.1188732693 T_A^2 s^2 + 0.4826920424 T_A s + 1$
$0.02165467341 T_A^3 s^3 + 0.1359583256 T_A^2 s^2 + 0.5992697270 T_A s + 1$
$0.002983403889 T_A^4 s^4 + 0.02680731598 T_A^3 s^3 + 0.1857098515 T_A^2 s^2 + 0.6310180425 T_A s + 1$
$0.0002746505836 T_A^5 s^5 + 0.003964445503 T_A^4 s^4 + 0.03649541614 T_A^3 s^3 + 0.2069545123 T_A^2 s^2 + 0.6595307094 T_A s + 1$

2.3 Método da Síntese Direta

Aqui vamos empregar a o método da síntese direta para projetarmos os três blocos do controlador, ou seja, $C_{SP}(s)$, $C_{PV}(s)$ e $PI(s)$. O ponto de partida é o projeto do $C_{SP}(s)$, o qual servirá de base para o projeto dos demais blocos. O ponto de partida é se especificar o desempenho desejável, que pode ser convertido em alcançável através de fatoração e inclusão

dos fatores de fase não mínima. O método da síntese direta consiste em fazer uso diretamente da expressão (2), que simplificada poderá ser reescrita da seguinte forma:

$$C(s) = \frac{1}{G(s)} \cdot \frac{1}{DEN_m(s)-1} \quad (4)$$

Para ilustrar a aplicação dessa expressão vamos utilizar a seguinte FT:

$$G(s) = \frac{K(Bs+1) \exp(-\theta s)}{(T_1^2 s^2 + 2ZT_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \cong \frac{K(Bs+1)}{(T_1^2 s^2 + 2ZT_1 s + 1)(\frac{\theta}{2} s + 1)^2} \quad (5)$$

Para levarmos em conta o tempo morto foi utilizada uma aproximação e fase mínima de segunda ordem.

Para projetar $C_{PV}(s)$, vamos usar uma sistemática similar a empregada para o projeto de $C_{SP}(s)$, ou seja, vamos primeiro desenvolver o controlador de elevada ordem $C(s)$, considerando a FT em malha fechada para $H(s)$ capaz de rejeitar os distúrbios da forma desejada e que compartilhe a mesma característica de desempenho especificada para $T(s)$, o que facilita no projeto e na fatoração final do controlador nos blocos utilizados na implementação envolvendo C_{PV} e PI . Aqui, nosso ponto de partida é a malha de controle com um grau de liberdade ilustrado na Figura 1, só que agora estamos interessados na capacidade de rejeição a distúrbios, a qual é dada por: $H(s) = \frac{G(s)}{1+GC(s)} = G(s) * S(s) = G(s)(1 - T(s))$ onde $S(s)$ representa a função de sensibilidade, i.e., $S(s) = \frac{1}{1+GC}$, a qual se relaciona a função complementar de sensibilidade $T(s)$ pela $S(s) = 1 - T(s)$. A vantagem de expressar a $H(s)$ usando diretamente $T(s)$ é que se utiliza a mesma especificação de desempenho empregada na determinação do filtro $C_{SP}(s)$. Para chegarmos à forma explícita para $C(s)$, vamos reescrever as equações anteriores da seguinte forma: $(1 - T(s)) * (1 + GC(s)) = 1$ mas para podermos ter mais um ponto de ajuste vamos reescrever essa expressão da seguinte forma:

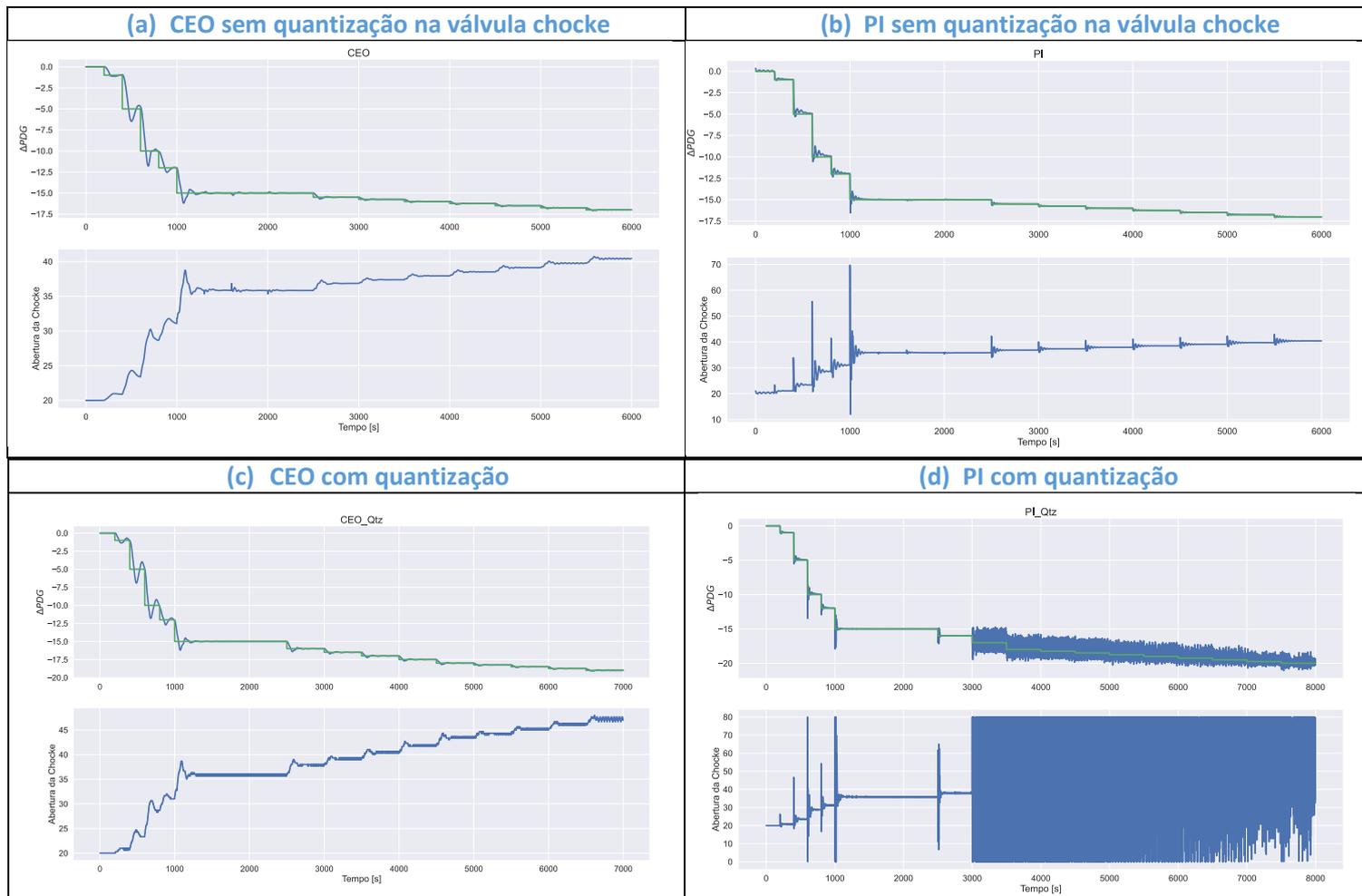
$$(1 - T(s)) * (1 + GC(s)) = \frac{T_1^2 s^2 + 2Z_d T_1 s + 1}{T_1^2 s^2 + 2Z T_1 s + 1} \quad (6)$$

Aqui se inseriu um valor de fator de subamortecimento desejado (Z_d) para se poder fazer um ajuste fino de comportamento que se almeja para o sistema.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Podemos ver na Figura 6 a simulação do modelo não linear implementado no simulador rigoroso LEDAFLOW empregando CEO e PI, onde as ações de controle calculadas pelo CEO são mais suaves produzindo resposta mais suaves na PDG, sem é claro deixar de serem rápidas. Por outro lado, o controlador PI gera ações de controle muito mais intensas, as quais acabam também gerando comportamento subamortecidos em malha fechada. A situação se torna crítica para o controlador PI no caso de haver quantização das ações de controle. Como podemos ver nas figuras 6c e 6d, o desempenho apresentado pelo CEO é similar ao caso sem quantização, enquanto para o caso PI a resposta se torna instável, devido à baixa robustez do controlador. Neste caso, a quantização, pode ser vista como se fosse um tempo morto na malha de controle., transformando o controlador PI em um controlador ON-OFF.

Figura 6: Simulação em LEDAFLOW do modelo não linear com o controlador (a,c) CEO e (b,d) PI. Subgráfico superior representa a PDG (sendo que quanto menor o setpoint maior a produção de petróleo) e no subgráfico inferior encontra-se a respectiva ação de controle.



4 CONCLUSÃO

As principais contribuições do presente artigo podem ser resumidas da seguinte forma: (i) se caracterizou as situações em que um controlador PI / PID não será suficiente para controlar adequadamente uma planta de elevada ordem; (ii) se propôs uma estrutura composta por três blocos para capaz de garantir anti-windup e dois graus de liberdade, o que é fundamental para o caso de sistemas altamente subamortecidos; (iii) baseado no método da síntese direta se desenvolveu uma sistemática simples e direta para o projeto do CEO com dois graus de liberdade, o qual tem por parâmetros de ajuste T_A tempo de assentamento e Z_d fator de amortecimento desejado para malha fechada e (iv) se validou através de uma simulação envolvendo um modelo não linear de um poço de petróleo o sucesso da metodologia proposta em dois cenários, com e sem quantização na válvula de controle.

5 REFERÊNCIAS

- D'AZZO, J.J. e HOUPIS, C. H., (1978), "Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares", Rio de Janeiro, editora Guanabara Dois
- Diehl, Fabio C. (2022), "Controle Ativo de Golfadas em Poços de Petróleo Offshore", Tese de Doutorado – UFRGS -- <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/241960>