

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DE UM SEPARADOR BIFÁSICO NÃO-LINEAR NA PRESENÇA DE GOLFADAS

AUTORES:

Alexandre Campos¹, Ingrid Nascimento¹, Ana Júlia da Silva¹

INSTITUIÇÃO:

¹Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade do Estado de Santa Catarina

CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DE UM SEPARADOR BIFÁSICO NÃO-LINEAR NA PRESENÇA DE GOLFADAS

Resumo

Este trabalho apresenta uma estratégia de controle destinada a mitigar os efeitos das golfadas nas vazões de entrada de um separador bifásico não linear. Para isso, utilizou-se um controlador proporcional-integral (PI). No processo de separação primária de petróleo, o vaso separador desempenha um papel crucial na separação das fases gás e líquida. Um dos desafios enfrentados pela indústria é o fenômeno das golfadas severas nas vazões de entrada do separador, que causam oscilações bruscas no nível, podendo resultar em danos ao equipamento e comprometer sua eficiência. Isso torna necessária uma ação de controle eficaz. Desenvolveu-se um código de simulação para modelar o comportamento do separador bifásico, cujo modelo matemático é não linear. Este código estabelece a função objetivo baseada em dois critérios: o menor tempo de assentamento do nível e a menor variação do nível dentro do separador. Empregando métodos numéricos e um algoritmo de otimização, foram determinados os valores ótimos para o controlador PI, resultando em um sistema mais estável e eficiente.

Palavras-chave: Separador Bifásico; Golfadas; Controle de Nível; Otimização.

Abstract

This work presents a control strategy aimed at mitigating the effects of slugging in the inlet flows of a nonlinear two-phase separator. For this, a proportional-integral (PI) controller was used. In the primary oil separation process, the separator vessel plays a crucial role in separating the gas and liquid phases. One of the challenges faced by the industry is the phenomenon of severe slugging in the separator's inlet flows, which causes abrupt oscillations in the level, potentially resulting in equipment damage and compromised efficiency. This necessitates an effective control action. A simulation code was developed to model the behavior of the two-phase separator, whose mathematical model is nonlinear. This code establishes the objective function based on two criteria: the shortest settling time of the level and the smallest variation within the separator. By employing numerical methods and an optimization algorithm, the optimal values for the PI controller were determined, resulting in a more stable and efficient system.

Keywords: Biphasic Separator; Severe Slugging; Level Control; Optimization.

Introdução

Segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2023), das reservas provadas de petróleo em território nacional, 460, 3 milhões de barris estão localizadas em terra, enquanto 14,4 bilhões de barris estão situados em ambientes offshore. A produção offshore envolve desafios significativos, com a necessidade de operar em profundas lâminas da água, percorrer longas distâncias para transportar o fluido até a plataforma e lidar com a instabilidade do leito marinho (ESSS Oil & Gás, 2021).

Um fenômeno indesejável que pode ocorrer durante o processo de produção de petróleo é conhecido como golfadas severas. Esse fenômeno é caracterizado por grandes variações nas taxas de produção, alternando entre a produção de altos volumes de óleo e altos volumes de líquido. As golfadas atingem o separador bifásico localizado na superfície de forma abrupta, causando danos ao separador e aos equipamentos da planta de processamento primário (JANSEN *et al*, 1996).

O separador bifásico é um equipamento essencial da planta de processamento, pois, durante a produção de petróleo, ocorre simultaneamente a produção de gás, água e impurezas. O separador é o primeiro equipamento a receber os fluidos provenientes do reservatório e é responsável pela separação das fases gás e líquido (THOMAS, 2001).

Para a funcionalidade eficiente do vaso separador é necessário a implementação de uma ação de controle eficaz. Esse trabalho implementa um controlador de ação proporcional-integral (PI) na válvula de saída de líquido do vaso separador bifásico. Para isso, foi necessário encontrar os melhores valores de ganhos proporcionais (k_p) e integrais (τ_i) para esse controlador. Recorreu-se ao uso de ferramentas computacionais, e implementou-se dois códigos no *Software Scilab®*. Um dos programas faz uma varredura dos parâmetros de forma manual, e gera gráficos de superfície, os quais facilitam a visualização de pontos de mínimos, ajudando a identificar possíveis faixas com bons valores de controlador. Com essa faixa de valores estabelecida, os parâmetros são inseridos no segundo programa, que utiliza técnicas de otimização buscando pelos valores ótimos de ganho proporcional (k_p) e integral (τ_i).

Modelagem

O modelo matemático do separador bifásico é baseado no modelo proposto por (NUNES, 2010), o qual é dado através da equação do volume do separador e do balanço de massa aplicado para a fase

líquida e para fase gasosa do fluído. Assumindo que o líquido é um fluido incompressível, o sistema está em equilíbrio termodinâmico, o gás é considerado ideal e o processo é isotérmico. Chega-se na equação diferencial ordinária do nível e da pressão.

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{L_{in} - L_{out}}{2C\sqrt{(D - h(t))h(t)}}$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P(t)[G_{in}(t) - G_{out}(t) + L_{in}(t) - L_{out}(t)]}{V - V_L(t)}$$

Onde, C é o comprimento do separador [m], D é o diâmetro do separador [m], V é o volume do vaso separador [m^3], L_{in} e G_{in} são o fluxo volumétrico de líquido e gás que entram no separador respectivamente [m^3/s], L_{out} e G_{out} são o fluxo volumétrico de líquido e gás que saem do separador respectivamente [m^3/s], h é o nível de líquido no separador [m], e P é a pressão [bar]. As válvulas de saída de líquido e gás são representadas pelas seguintes equações.

$$L_{out}(t) = 2,4 \times 10^{-4} \cdot x_L(t) \cdot C_V \sqrt{\frac{P(t) - P_1}{\rho_L / \rho_{(H_2O, 15,5^\circ C)}}}$$

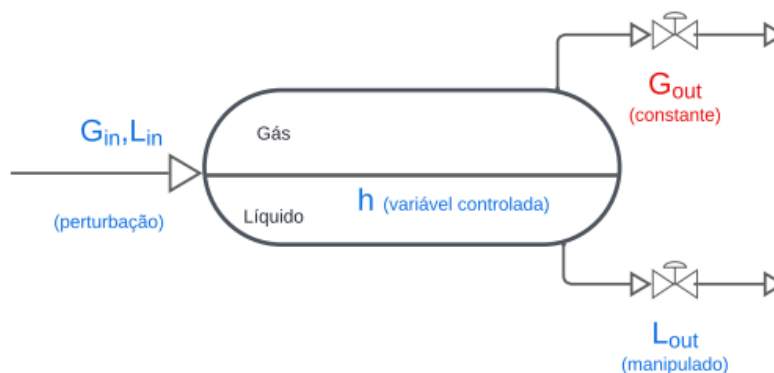
$$G_{out}(t) = 2,4 \times 10^{-4} \cdot x_G(t) \cdot C_V \sqrt{\frac{(P(t) - P_2)(P(t) + P_2)Mm_{AR}T(t)}{P(t) \cdot Mm_G T_{AR}}}$$

Onde, T é a temperatura do sistema [K], Mm_{AR} e Mm_G são as massas molares do ar e do gás respectivamente [kg/mol], P_2 é a pressão a jusante da válvula de gás [bar], C_V é o coeficiente de fluxo da válvula, x_L e x_G é a fração de abertura da válvula de líquido e gás respectivamente. As entradas de gás e líquido no separador podem ser reais ou aproximações de modelos reais, como é o caso da função seno. Os controladores podem ser ajustados de acordo com novas perturbações, desde que essas possam ser medidas. Este trabalho está limitado a perturbações representadas por golfadas modeladas como senoides, conforme modelo descrito por Nunes (2010). Trabalhos futuros poderão investigar outros tipos de perturbações detectadas no sistema.

$$G_{in}(t) = L_{in}(t) = 0,165 \sin(0.333t)$$

As equações do modelo matemático do separador foram aplicadas em diagrama de blocos do Xcos®. No contexto desse estudo, a variável manipulada é a vazão de líquido que sai do separador (L_{out}), podendo ser ajustada através da válvula de saída. A variável de controle é o nível (h) de líquido dentro do separado, cujo valor desejado é mantido por meio de ações de controle. Por fim as vazões de gás e líquido (G_{in} , L_{in}) que entram no separador e podem ser caracterizadas como golfadas, são as variáveis de perturbação.

Figura 1 - Separador bifásico



Fonte: Elaborado pelos autores

Estratégia de Controle

O controlador em um sistema de controle de malha fechada recebe o valor real ou valor medido, que é então comparado com o valor de referência ou set point. A diferença entre o valor real e o set point é calculada pelo controlador, resultando no erro (SEBORG, 2011). Este trabalho utiliza um controlador do tipo proporcional integral (PI) para controlar o nível dentro do separador.

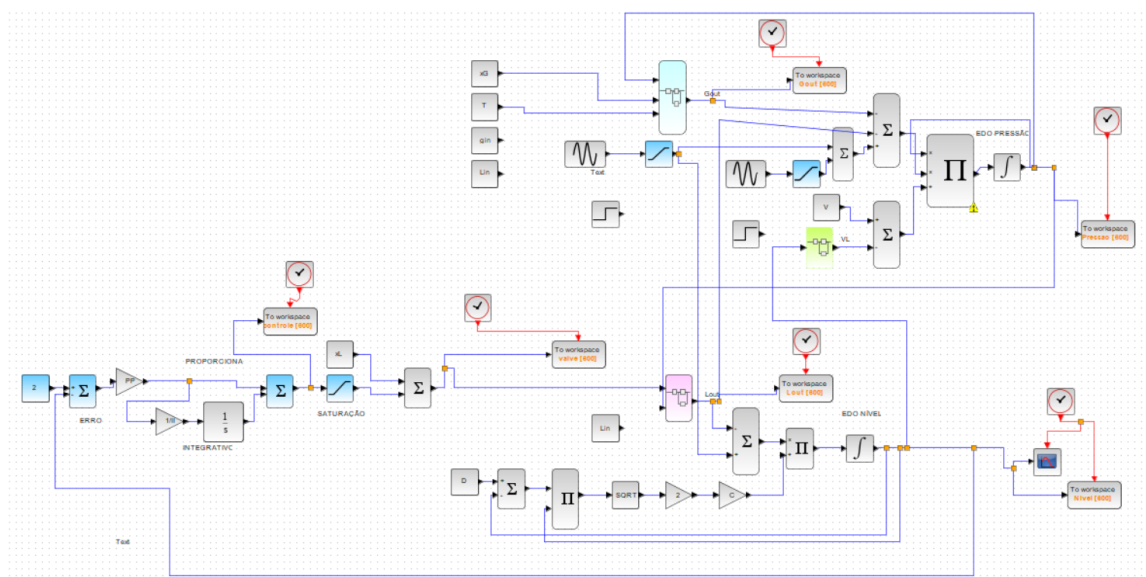
Para determinar os melhores valores de ganho proporcional (k_p) e tempo de integração (τ_i), foram implementados dois códigos no software Scilab®. O primeiro código explorou uma extensa faixa de valores para k_p e τ_i , testando diferentes combinações de valores e gerando gráficos de superfície que facilitaram a análise do comportamento da função derivada.

O segundo código também foi desenvolvido no Scilab®, utilizando a função “optim”, específica para resolver problemas de otimização não-linear através do algoritmo Quasi-Newton (qn), um método iterativo baseado em gradiente (SCILAB ENTERPRISES, 2011). Para encontrar o mínimo da função foram utilizados valores iniciais para k_p e τ_i , baseados no comportamento observado nos gráficos de superfície gerados pelo primeiro código.

Ao analisar diferentes respostas do nível, o critério para a escolha do controlador foi baseado em dois fatores principais: 50% do peso foi atribuído ao menor delta (Δ), que é a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo que o nível atinge, e os outros 50% foram atribuídos ao menor tempo de assentamento (t_s). O tempo de assentamento foi definido como o tempo necessário para que o nível permanecesse dentro de uma banda de $\pm 5\%$ em torno do valor desejado de 2 metros.

O modelo matemático do separador foi implementado em diagrama de blocos do Xcos®, uma ferramenta do Scilab®. O diagrama completo encontra-se na figura 2 e representa as equações modeladas na seção anterior e a ação do controlador proporcional-integral.

Figura 2 Diagrama de blocos do separador bifásico no Xcos®



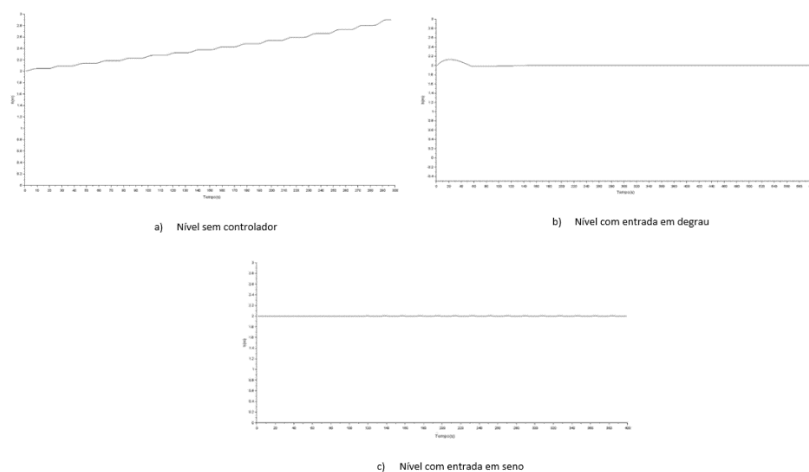
Fonte: Elaborado pelos autores

Os blocos da parte superior da planta representam a EDO da pressão, as equações da válvula de gás, a equação do volume do separador e as golfadas de gás e líquido que entram no separador. Os blocos localizados na parte inferior da planta representam a EDO do nível e a equação da válvula de óleo. Os blocos localizados no centro à esquerda representam o controlador proporcional integral (PI), que recebe o valor de set-point, estabelecido em dois metros, compara com o valor real do nível, calcula o erro, aplica a medida corretiva e envia o sinal de controle para a válvula de saída de líquido do separador.

Resultados e Discussões

Para somar valores de uma otimização bi variável, em que Δ está em metros e t_s em segundos, normalizou-se os valores passando-os para porcentagem, a soma resultou no índice. O objetivo é minimizar o índice através da melhor combinação entre k_p e τ_i . A figura 3.a representa o comportamento do nível na presença de golfadas e sem controlador, percebe-se que este permanece instável.

Figura 3 Comportamento do nível



Fonte: Elaborado pelos autores

O melhor valor encontrado na otimização foi de $k_p = -5600$ e $\tau_i = 200$, retornando um valor de $\Delta = 0,14 \text{ m}$ e $t_s = 0,34 \text{ s}$. Esses valores foram calibrados utilizando um degrau na entrada do separador, uma vez que a entrada em degrau é mais brusca e difícil de controlar. Ajustes adicionais podem ser feitos nos controladores e outras perturbações podem ser consideradas, embora isso não esteja no escopo desse artigo. A figura 3.b mostra o comportamento do nível quando calibrado utilizando a entrada em degrau. Por fim a figura 3.c apresenta o sistema com o controlador otimizado, utilizando a função seno para representar as golfadas reais. Observa-se que o nível se estabiliza dentro da faixa estabelecida, comprovando a necessidade de uma ação de controle eficaz.

Conclusões

Otimização em funções não lineares não é uma tarefa fácil pois a função objetivo não é necessariamente conhecida ou convexa, podendo apresentar diversos mínimos locais (BOYD; VANDENBERGHE, 2004). Foram encontrados valores para k_p e τ_i que minimizaram o índice e trouxeram ótimos resultados mantendo o nível do separador dentro da banda estabelecida. No entanto deve-se sempre levar em consideração a possibilidade de o algoritmo ter ficado preso em mínimos locais, uma vez que não se conhece o mínimo global.

Uma ação de controle eficaz demonstrou ser crucial para estabilizar o nível dentro do separador, especialmente em condições de entrada perturbadoras como as golfadas. A metodologia utilizada, combinando a análise gráfica e otimização numérica, provou ser eficiente na determinação dos

parâmetros ótimos do controlador PI. A aplicação de uma entrada em degrau e a análise subsequente com a função seno mostraram que o sistema responde de maneira estável e previsível, validando a abordagem proposta.

Adicionalmente, o estudo destaca a importância de utilizar técnicas robustas de otimização e análise para sistemas de controle em ambientes desafiadores como a produção de petróleo offshore. Futuras pesquisas podem explorar a aplicação de métodos de otimização mais avançados para melhorar ainda mais o desempenho do sistema em condições variáveis e incertas.

Agradecimentos

Este estudo faz parte do projeto “Optimized use of dispersants in subsea spills” um acordo de cooperação entre a UDESC e a PETROBRAS (Nº 0050.0125248.23.9) regulado pelas cláusulas de investimento em PD&I da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Resolução ANP 03/2015).

Referências Bibliográficas

ANP. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis 2023. [S.l.] 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2023/anuario-2023.pdf>. Acesso em: 08 jun 2024.

BAUDIN, MICHAEL. **Optimization in Scilab**, 2010. Disponível em: <https://www.scilab.org/optimization-in-scilab-tutorial>. Acesso em: 08 jun 2024.

ESSS OIL & GAS. *Severe slugging in the upstream industry: how to address this issue using ALFAsim (Part I)*. Disponível em: <https://oilandgas.esss.co/blog/severe-slugging-alfasim-part-1/>. Acesso em: 4 jul. 2024

JANSEN, F. E.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y. **THE ELIMINATION OF SEVERE SLUGGING-EXPERIMENTS AND MODELING** Int. J. Multiphase Flow. [s.l: s.n.].

NUNES, Cavalcanti Giovani. **Modeling and Control in Oil Production: Applications in matlab**. São Paulo: Edgard Blicher Ltda, 2010.

SCILAB ENTERPRISES. *Scilab Optimization*. 2011. Disponível em: https://www.scilab.org/sites/default/files/Scilab_Optimization_201109.pdf. Acesso em: 3 jul. 2024

SEBORG, D. E. et al. **Process dynamics and control**. 3. ed. United States of America: Wiley, 2011

THOMAS, J.E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.