

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



TÍTULO DO TRABALHO:

Implementação de um modelo de separador bifásico e controle de nível usando Hardware-in-the-loop

AUTORES:

Ana Júlia da Silva¹, Aníbal Alexandre Campos Bonilla¹

INSTITUIÇÃO:

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO DE SEPARADOR BIFÁSICO E CONTROLE DE NÍVEL USANDO HARDWARE-IN-THE-LOOP

Resumo

A etapa inicial do processo de refino do petróleo em plantas de produção é dedicada à separação do óleo, gás e água provenientes dos poços de produção, atribuindo a cada elemento sua destinação apropriada. Essa etapa emprega o separador bifásico, responsável pela separação das fases líquida e gasosa. Devido às características do fluxo de entrada, o separador frequentemente enfrenta oscilações de nível que, se não controladas, podem interromper todo o processo. Com base nessa premissa, este trabalho propõe a implementação do sistema em Hardware-in-the-Loop (HiL), fornecendo uma ferramenta para testes e desenvolvimento de controle. O modelo do separador foi primeiramente simulado em diagrama de blocos no aplicativo Xcos®, no ambiente do programa Scilab® (versão 6.1.1), e, posteriormente, emulado através do Hardware-in-the-Loop, onde foi validado com base na simulação do Scilab®. Após a validação, a malha do sistema foi fechada com um controlador instalado na válvula de saída de líquido, capaz de estabilizar o nível no separador. A implementação via HiL forneceu resultados que, quando comparados à simulação feita no Scilab®, apresentaram semelhanças significativas. Os resultados da emulação foram promissores, e o controle conseguiu estabilizar a planta que recebia perturbações em regime de fluxo de golfadas.

Palavras-chave: Separador Bifásico. Microcontroladores. Sistema de Controle. Golfadas.

Abstract

The initial stage of the oil refining process in production plants is dedicated to the separation of oil, gas, and water from production wells, assigning each element its appropriate destination. This stage employs a two-phase separator, responsible for separating the liquid and gaseous phases. Due to the characteristics of the inlet flow, the separator frequently experiences level fluctuations which, if not controlled, can interrupt the entire process. Based on this premise, this work proposes the implementation of the system in Hardware-in-the-Loop (HiL), providing a tool for testing and control development. The separator model was first simulated using a block diagram in the Xcos® application, within the Scilab® program environment, and then emulated through Hardware-in-the-Loop, where it was validated based on the Scilab® simulation. After validation, the system loop was closed with a controller installed on the liquid outlet valve, capable of stabilizing the level in the separator. The implementation via HiL provided results that, when compared to the simulation performed in Scilab®, showed significant similarities. The emulation results were promising, and the control was able to stabilize the plant, which was subject to slug flow disturbances.

Keywords: Biphasic Separator. Microcontrollers. Control System. Slug Flow.

Introdução

O petróleo tem sido utilizado desde a antiga Babilônia até as civilizações pré-colombianas para diversas finalidades por diferentes civilizações ao longo da história (THOMAS, 2001). A era do petróleo começou em 1859 com a destilação lucrativa de seus derivados. Nos anos 1950, a exploração se intensificou, incluindo operações em águas profundas. O petróleo se tornou uma fonte de energia crucial, juntamente com a petroquímica, que produzia uma ampla gama de derivados (THOMAS, 2001). No Brasil, a busca por petróleo começou em 1858, mas as grandes descobertas ocorreram na década de 1980 nos campos em águas profundas da Bacia de Campos. A produção de petróleo no país cresceu significativamente desde a criação da Petrobras até o final dos anos 1990, impulsionada por avanços tecnológicos na perfuração e produção em águas profundas (THOMAS, 2001). Conforme o Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural da ANP de agosto de 2023, os campos marítimos no Brasil foram responsáveis por 97,7% da produção de petróleo e 87% da produção de gás natural. Esses números destacam a importância dos campos offshore e a necessidade de tecnologias eficientes para aumentar a produtividade e melhorar os processos de produção.

A produção de petróleo bruto em campos offshore utiliza uma rede de risers (dutos que se estendem do leito marinho até a plataforma) para direcionar o petróleo até a planta de processamento primário (PPP) localizada na plataforma, a fim de realizar a separação das misturas e impurezas. A PPP tem como objetivo separar o gás em condições operacionais controladas, removendo água, sais e outras impurezas, para que o óleo fique pronto para ser transferido para a refinaria (GONÇALVES; DE FREITAS, 2007). O PPP é projetado com uma série de facilidades para otimizar a produção, incluindo vasos separadores gravitacionais, aquecedores e tratadores de óleo; cada equipamento desempenha uma função essencial no processo. O primeiro equipamento a receber o petróleo bruto é o separador de primeiro estágio. Ele é um vaso separador gravitacional bifásico que realiza a separação inicial de fases (SILVA DE SANTANA; MACHADO, 2015).

O separador bifásico é crucial nesse processo, separando os componentes gasosos dos líquidos. No Brasil, a exploração em águas profundas, especialmente no pré-sal, apresenta desafios operacionais como fluxos em golfadas, que causam problemas nos separadores devido a flutuações na pressão e vazão (PEDERSEN; DURDEVIC; YANG, 2017). Para mitigar esses problemas, são exploradas estratégias de controle de fluxos para as plantas de processamento.

A simulação via Hardware-in-the-Loop (HiL) emerge como uma abordagem interessante para testes de sistemas integrados, especialmente relevante para o desenvolvimento de controladores em ambientes complexos de produção de petróleo e gás, eliminando a necessidade de componentes físicos. Caso existissem, esses componentes acarretariam gastos significativos com equipamentos, utilidades, pessoal e manutenção, resultando em economias financeiras substanciais (GREGA, 2003). Deste modo, o objetivo deste trabalho é implementar um modelo de separador bifásico controlado usando a técnica Hardware-in-the-Loop (HiL) para manter o nível de líquido dentro do separador estável, mesmo diante de perturbações ocasionadas pelos risers de produção.

Metodologia

Modelagem do separador bifásico

O controle do nível no interior do SB se dá através da manipulação da abertura da válvula xL, enquanto as vazões de entrada de gás e líquido são consideradas perturbações. A modelagem do SB, que descreve o fenômeno físico, é feita através da formulação de uma equação diferencial ordinária (EDO) simplificada para facilitar a modelagem. O modelo não linear será simulado no Xcos® e emulado via HiL. Além disso, um controlador proporcional-integral (PI) será implementado, e os resultados de ambos os testes serão comparados para validar a simulação via HiL. A validação em malha fechada inclui a aplicação dos controladores PI e a comparação dos resultados da simulação no Xcos® com a emulação HiL. O modelo de um SB, proposto por Nunes (2010), apresenta um tanque cilíndrico onde a mistura de óleo e gás dissolvido entra como uma variável de perturbação. Após a separação no tanque, o gás e o óleo saem por válvulas superiores e inferiores, respectivamente. As variáveis-alvo para controle são a pressão dentro do tanque e o nível de óleo. A Figura 1 mostra a funcionalidade do separador.

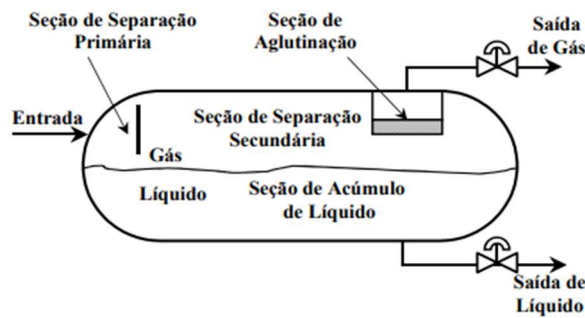


Figura 1 - Separador bifásico (Adaptado de Petrobras, 2007)

Na entrada do separador, L_{in} e L_{out} representam as entradas e saídas de líquido (m^3/s), respectivamente; G_{in} e G_{out} representam as entradas e saídas de gás (m^3/s). C é o comprimento do separador (m), D é o seu diâmetro (m), h é o nível do líquido (m), P é a pressão (bar) e T é a temperatura (K) dentro do separador. As variáveis x_L e x_G correspondem aos valores de abertura das válvulas de líquido e gás, variando de 0 (totalmente fechadas) a 1 (totalmente abertas) (TRENTINI et al., 2023). A expressão que descreve o fluxo de saída linear de uma válvula, comumente utilizada na indústria, é:

$$L_{out}(t) = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot x_L(t) \cdot C_{VL} \cdot \sqrt{\frac{P(t) - P_1}{\frac{\rho_L}{\rho_{H_2O}}}}, \quad (1)$$

$$G_{out}(t) = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot x_G(t) \cdot C_{VG} \cdot \sqrt{\frac{(P(t) - P_1) \cdot (P(t) - P_2) \cdot Mm_{AR} \cdot T(t)}{P(t) \cdot Mm_G \cdot T_{ar}}}, \quad (2)$$

Através da equação do balanço de massa obtêm-se as equações para a fase líquida e gasosa:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{L_{in} - L_{out}}{2C \sqrt{(D - h(t))h(t)}}, \quad (3)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P(t)[G_{in}(t) - G_{out}(t) + L_{in}(t) - L_{out}(t)]}{V - V_L(t)} \quad (4)$$

Portanto, as equações de L_{in} e G_{in} , que representam o fluxo de entrada, podem ser simplificadas para ondas senoidais:

$$G_{in}(t) = L_{in}(t) = 0,165\text{sen}(0.333t) \quad (5)$$

Os valores das constantes utilizados para elaborar os cálculos do modelo do separador neste trabalho são os mesmos utilizados por Nunes (2010).

No projeto, o uso de um controlador proporcional-integral (PI) é ideal devido à sua eficácia em lidar com golfadas ou variações bruscas, ao contrário dos controladores derivativos que amplificam oscilações indesejadas (LUYBEN, 2001). O controle é aplicado apenas na abertura da válvula de descarga x_L , controlada em circuito fechado, como mostrado na Figura 2.

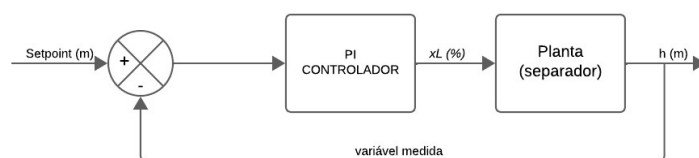


Figura 2 – Configuração do sistema controlado

Foi implementado no Scilab® e Xcos® (versão 6.1.1), o modelo do separador bifásico descrito nas seções anteriores bem como as perturbações nas formas de golfadas, além do seu controle (PI), a fim de comparar a simulação realizada com a emulação do modelo utilizando o Hardware-in-the-loop. A técnica de “Hardware-in-the-Loop” (HiL) utiliza um modelo de simulação para replicar o processo real, gerando sinais em tempo real que são convertidos em tensões por módulos digitais analógicos e enviados ao controlador. O controlador, por sua vez, gera sinais de controle convertidos em dados pelo modelo de simulação por conversores A/D. O objetivo é fazer com que os componentes de hardware se comportem semelhantemente aos do sistema real (Grega, 1999). Um sistema HiL conecta diversos elementos essenciais, incluindo um hardware de desenvolvimento (como um computador), um processador em tempo real para emular a planta física, e um hardware de controle.

Para implementar a técnica HiL, o microcontrolador de circuito integrado foi utilizado para emular o separador bifásico, além de outro microcontrolador que desempenhou a função de controle de abertura da válvula de líquido na saída da planta. Portanto, para emular a planta (SB), as equações ordinárias que descreve o modelo do SB foi resolvido através do método de Runge-Kutta de quarta ordem. A representação detalhada do processo de prototipagem do sistema pode ser observada na Figura 3.

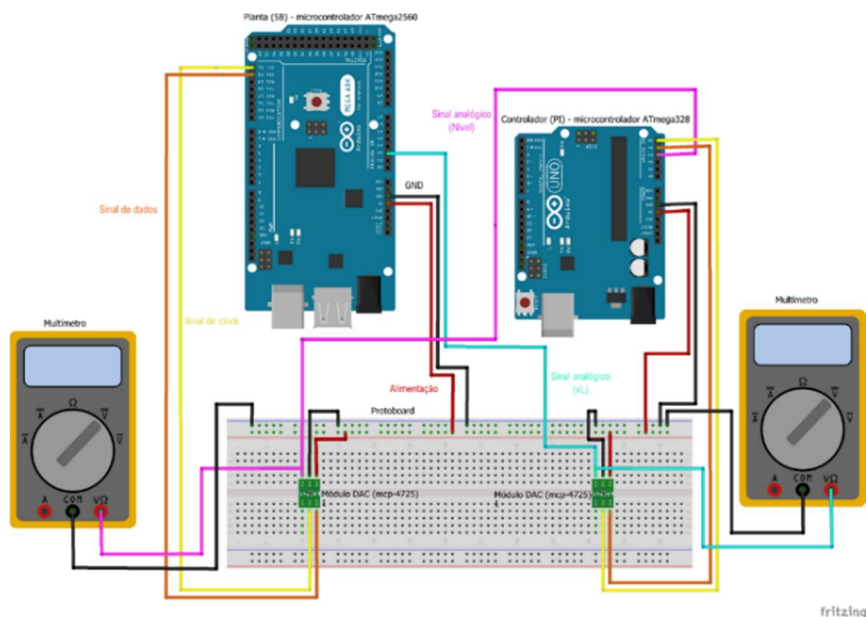


Figura 3 – Esquemático de prototipagem - protoboard

Com o HiL configurado, testes foram conduzidos do controlador em tempo real em um ambiente simulado (planta). O controlador emite comandos para a planta, que responde como se estivesse interagindo com o sistema real.

Resultados e Discussão

Para o controlador PI, foram implementadas as ações proporcionais e integrais (PI), cujos ganhos foram determinados empiricamente.

Descrição	Ganho	Valor
Ganho proporcional	K_p	-10
Ganho integral	T_i	10

Tabela 1 – Sintonia do controlador PI

Os resultados obtidos por meio do HiL foram registrados usando o recurso de streaming de dados do Excel. Portanto, destacam-se os resultados da planta HiL com as perturbações em golfadas e o controlador PI, utilizando a sintonia descrita na Tabela 1. O controle foi aplicado à válvula de saída de líquido para manter o nível do separador, como representado na Figura 4a.

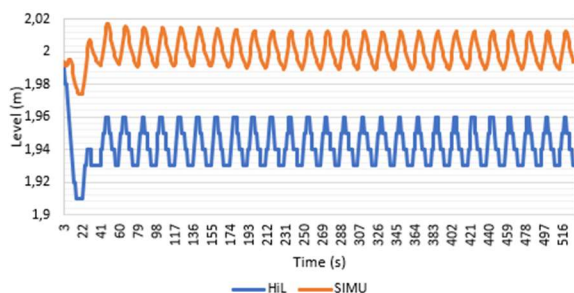


Figura 5a - Planta em malha fechada

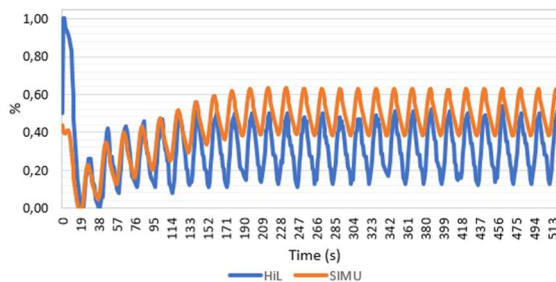


Figura 4b - Porcentagem de abertura da válvula

Foram aplicadas golfadas (Eq. 5) nas entradas L_{in} e G_{in} , enquanto o controlador atuava no nível. Na Figura 4a, é possível visualizar o gráfico do nível tanto na simulação pelo Xcos® quanto na emulação via HiL, com a representação da porcentagem de abertura da válvula (Figura 4b) para cada cenário correspondente. Ao observar a figura acima, percebe-se a influência das golfadas na altura do nível de líquido dentro do SB. À medida que o nível oscila, as válvulas trabalham para corrigir o erro e manter o SB no nível desejado. Comparando a simulação com a emulação realizada, a variável controlada (nível) manteve o erro relativo médio próximo a 3%. A variável manipulada (percentual de abertura da válvula) apresentou um erro relativo médio em torno de 40%.

A simulação em Xcos® pode utilizar simplificações que não capturam completamente a dinâmica real do sistema, resultando em discrepâncias em relação ao HiL. O HiL pode introduzir erros de medição devido a resoluções analíticas aproximadas que não representam fielmente o comportamento real do sistema, o que afeta a precisão do controle. Além disso, o HiL simula condições reais, incluindo perturbações como golfadas, que podem impactar o sistema de maneira diferente da simulação. Por fim, diferenças no tempo de resposta e na dinâmica do sistema físico, em comparação com a simulação, podem alterar o desempenho do controle em tempo real.

Conclusões

Este estudo focou na separação inicial de óleo e gás na unidade de processamento primário de petróleo (PPP), utilizando um sistema Hardware-in-the-Loop (HiL) para testar um separador bifásico (SB) em malha fechada com controle, visando resolver desafios de golfadas induzidas pelo fluxo de entrada. O modelo do SB foi simulado com Xcos®, validado no microcontrolador ATmega2560 e controlado para estabilizar o nível de líquido no separador. A abordagem HiL é útil para o desenvolvimento de controladores do SB, contribuindo para operações mais estáveis. Futuras melhorias incluem o controle de pressão interna e o uso de microcontroladores mais robustos. Os resultados enfatizam a importância de simulações via HiL e controle no processamento de óleo e gás, com potencial para aumentar a eficiência e estabilidade dos processos na indústria.

Agradecimentos

Este estudo faz parte do projeto 'Uso otimizado de dispersantes em derramamentos submarinos', um acordo de cooperação entre a UDESC e a PETROBRAS (Nº 0050.0125248.23.9) regulamentado por cláusulas de investimento em P, D&I da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Resolução ANP 03/2015)

Referências Bibliográficas

THOMAS, JOSE EDUARDO. FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA DO PETRÓLEO. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

NUNES, CAVALCANTI GIOVANI. MODELING AND CONTROL IN OIL PRODUCTIONN: APPLICATIONS IN MATLAB. São Paulo: Edgard BIUcher Ltda, 2010.

ANP. BOLETIM DA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>>. Acesso em: 13 out. 2023.

GONÇALVES, A.; DE FREITAS, B. INVESTIGAÇÃO DAS FACILIDADES E MÉTODOS UTILIZADOS ATUALMENTE NO PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE PETRÓLEO EM CAMPOS ONSHORE E OFFSHORE. Campinas, SP, out. 2007. Disponível em: <https://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO_2_3_0322-1.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2024.

SILVA DE SANTANA, T.; MACHADO, L. PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE FLUIDOS NA PRODUÇÃO DO PETRÓLEO. Aracaju, v. 2, p. 11-20, mar. 2015. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/download/1802/1191/6670>>. Acesso em: 25 jul. 2024.

PEDERSEN, S.; DURDEVIC, P.; YANG, Z. CHALLENGES IN SLUG MODELING AND CONTROL FOR OFFSHORE OIL AND GAS PRODUCTIONS: A REVIEW STUDY. International Journal of Multiphase Flow, v. 88, p. 270–284, 1 jan. 2017.

W. GREGA, HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATION AND ITS APPLICATION IN CONTROL EDUCATION. FIE'99 Frontiers in Education. 29th Annual Frontiers in Education Conference. Designing the Future of Science and Engineering Education. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.99CH37011, San Juan, PR, USA, 1999, pp. 12B6/7-12B612 vol.2, doi: 10.1109/FIE.1999.841594.

NUNES, CAVALCANTI GIOVANI. MODELING AND CONTROL IN OIL PRODUCTIONN: APPLICATIONS IN MATLAB. São Paulo: Edgard BIUcher Ltda, 2010.

TRENTINI, R.; CAMPOS, A.; SALVADOR, M.A.; SCHEUER, Y.M.; DOS SANTOS, C.H.F. UNRESTRICTED HORIZON PREDICTIVE CONTROLLER APPLIED IN A BIPHASIC OIL SEPARATOR UNDER PERIODIC SLUG DISTURBANCES. Processes 2023, 11, 928. <https://doi.org/10.3390/pr11030928>.

LUYBEN, WILLIAM L. EFFECT OF DERIVATIVE ALGORITHM AND TUNING SELECTION ON THE PID CONTROL OF DEAD-TIME PROCESSES. Industrial & engineering chemistry research, ACS Publications, v. 40, n. 16, p. 3605–3611, 2001.