

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



TÍTULO DO TRABALHO:

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE UM SEPARADOR BIFÁSICO DE ÓLEO E GÁS EM MICROCONTROLADORES PARA TESTES DE SISTEMAS DE CONTROLE VIA HIL

AUTORES:

Yuri Matheus Scheuer, Marcos Antônio Salvador, Rodrigo Trentini

INSTITUIÇÃO:

Instituto Federal de Santa Catarina – câmpus Jaraguá do Sul (Rau)

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE UM SEPARADOR BIFÁSICO DE ÓLEO E GÁS EM MICROCONTROLADORES PARA TESTES DE SISTEMAS DE CONTROLE VIA HIL

Resumo

Na primeira fase do refino de petróleo, o separador bifásico (SB) separa óleo, gás e água dos poços. Devido às oscilações de pressão e nível do fluxo de entrada, o SB pode enfrentar interrupções. Este trabalho propõe a implementação de um sistema Hardware-in-the-Loop (HiL) para testar e desenvolver controladores. O modelo do SB foi simulado no Simulink e validado no microcontrolador ATMEGA2560. Após a validação, foram adicionados controladores às válvulas de saída, estabilizando a pressão e o nível no separador.

Palavras-chave: Separador Bifásico, Hardware-in-the-Loop, Simulação de Tempo Real, Sistemas de Controle.

Abstract

In the first phase of oil refining, the two-phase separator (SB) separates oil, gas, and water from the wells. Due to fluctuations in pressure and level from the input flow, the SB may experience interruptions. This work proposes implementing a Hardware-in-the-Loop (HiL) system to test and develop controllers. The SB model was simulated in Simulink and validated on the ATMEGA2560 microcontroller. After validation, controllers were added to the outlet valves, stabilizing the pressure and level in the separator.

Keywords: Biphasic Separator, Hardware-in-the-Loop, Real Time Simulation, Control Systems.

Introdução

Para entender fenômenos físicos em aplicações científicas e de engenharia, são desenvolvidos modelos matemáticos frequentemente baseados em equações diferenciais. Esses modelos permitem simular digitalmente o comportamento dos fenômenos em tempo real, utilizando Simuladores Digitais de Tempo Real (SDTR). A precisão da simulação depende da complexidade das equações usadas.

Nas simulações em tempo real, a ferramenta Hardware-in-the-Loop (HiL) é destacada por sua eficácia. O HiL permite que modelos de sistemas sejam implementados em dispositivos digitais, como computadores e microcontroladores (MICs), que emulam o comportamento dinâmico do sistema. Isso elimina a necessidade de uma planta física e facilita a concepção e teste de sistemas de controle [1]. Ter a planta em ambiente digital (HiL) faz com que até mesmo as medições das variáveis de interesse possam ser obtidas do modelo digital, sem necessidade de sensoriamento real, visto que a planta física e seus componentes não são necessários para este tipo de implementação.

O HiL tem se mostrado crucial tanto no ambiente acadêmico quanto industrial, permitindo a análise de sistemas complexos, reduzindo custos e possibilitando testes em condições extremas de forma segura. Além disso, as técnicas de SDTR são valiosas no ensino de sistemas de controle, oferecendo uma experiência de aprendizado mais completa para estudantes [2].

A aplicabilidade da simulação digital é vasta, com estudos em diversas áreas. Em bioengenharia, por exemplo, pesquisas abordam a simulação de modelos fisiológicos de órgãos humanos. Na engenharia elétrica, o HiL tem sido utilizado para testar controladores em sistemas fotovoltaicos e em simulações de geração eólica [3]. No setor de óleo e gás, a simulação em tempo real ajuda a desenvolver e validar controladores para sistemas complexos, como separadores bifásicos utilizados no processamento de petróleo [4].

Este trabalho visa implementar um modelo de separador bifásico (SB) em uma plataforma microcontrolada, permitindo o desenvolvimento e teste de sistemas de controle sem a necessidade de uma planta física, aproveitando as capacidades do HiL e dos SDTR [5].

O trabalho está dividido nas seções: Processamento Primário (Fundamentação Teórica), Metodologia e Resultados.

Processamento Primário

No processo de extração de petróleo em alto mar, nos dutos de elevação (risers), ocorre o escoamento multifásico, composto por uma mistura de água, óleo e gás. Esse escoamento, composto por fluxo de gás e líquido, pode apresentar um comportamento oscilatório em golfadas em alguns momentos, influenciando vários processos da cadeia produtiva das plataformas [8]. Para a produção de óleo e gás, os campos de produção têm instalações para processar os fluidos corretamente.

Este trabalho foca exatamente na primeira etapa do processamento primário, o separador bifásico de óleo e gás. Inicialmente, o gás, por ter menor densidade, é separado dos líquidos pela gravidade no “separador bifásico”, que tem seções de separação, conforme indicado na Fig. 1. O fluido choca-se com dispositivos defletores, alterando a velocidade e direção do fluxo, direcionando os líquidos para o fundo; na seção de sedimentação, ocorre a decantação das gotículas de óleo na fase gasosa. O fluxo gasoso ainda retém partículas de óleo, capturadas na seção de aglutinação, junto à saída de gás [6].

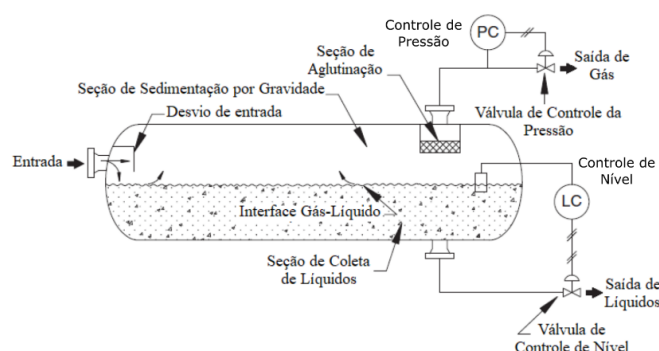


Figura 1 – Separador bifásico horizontal. Adaptado de [9].

Os elementos líquidos e gasosos separados são encaminhados para as etapas seguintes do processamento por meio das válvulas de saída [6]. Durante a extração, podem ocorrer golfadas, formadas por bolhas de gás alongadas, conhecidas como “bolhas de Taylor”, que ocupam a maior parte da seção transversal dos dutos, com líquidos fluindo ao redor delas [9].

Golfadas podem trazer grandes volumes de líquidos, causando elevações abruptas no nível do SB. Portanto, identificar esse fluxo turbulento é crucial no projeto do SB, estabelecendo um limiar entre o nível de operação e o de desligamento, permitindo ao cilindro acomodar a elevação sem interromper o processo [7].

Metodologia

O desenvolvimento do presente trabalho pode ser descrito a partir das seguintes etapas:

- Pesquisa e análise da modelagem matemática de um SB horizontal;
- Emulação e validação da planta em um microcontrolador;
- Implementação e validação de dois controladores PI digitais, nas válvulas de óleo e de gás;
- Comparação dos resultados simulados através do Simulink, com os resultados obtidos através da emulação da planta e dos controladores implementados em microcontroladores.

Modelagem Matemática de um SB Horizontal

O primeiro passo para a implementação de um sistema em HiL é a obtenção de um modelo matemático confiável que seja capaz de representar o seu comportamento adequadamente. Com base em [8], foram obtidas as principais equações que descrevem o funcionamento de um SB, considerando as seguintes premissas:

- O sistema está em equilíbrio termodinâmico;
- O gás é modelado como gás ideal;
- As equações das vazões de óleo e gás apresentam como variáveis dinâmicas a pressão de operação do vaso e a abertura das respectivas válvulas;
- O processo é isotérmico.

Os valores das constantes aplicadas ao modelo são apresentados na Tab. I. A Tab. II, por sua vez, apresenta os valores das principais variáveis em regime permanente.

TABELA I

Constantes do Separador Bifásico			
Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
C_{VL}	Coef. vazão válvula líquidos	1025	gpm/psi
C_{VG}	Coef. vazão válvula gases	120	gpm/psi
ρ_L	Densidade fase líquida	850	kg/m ³
ρ_{H_2O}	Densidade da água	999,2	kg/m ³
P_1, P_2	Pressões a jusante do SB	6	bar
T	Temperatura da fase gasosa	303,2	K
MM_G	Massa molar do gás	0,02	kg/mol
R	Constante geral dos gases	8,31	J/mol K
D	Diâmetro do SB	3,00	m
C	Comprimento do SB	8,00	m
V	Volume total do SB	56,6	m ³

TABELA II

Valores em regime permanente			
Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
$\bar{x}_L$	Taxa de abertura válvula líq.	0,4375	-
$\bar{x}_G$	Taxa de abertura válvula gás	0,0536	-
$\bar{L}_{in}$	Vazão de entrada líq.	0,165	m ³ /s
$\bar{L}_{out}$	Vazão de saída líq.	0,165	m ³ /s
$\bar{G}_{in}$	Vazão de entrada gás	0,1	m ³ /s
$\bar{G}_{out}$	Vazão de saída gás	0,1	m ³ /s
$\bar{h}_L$	Nível interno do SB	2,0	m
$\bar{P}$	Pressão interna do SB	8,0	bar
$\bar{V}_L$	Volume interno do SB	40,05	m ³

As vazões de entrada de gás e líquido possuem natureza oscilatória e são consideradas como perturbações lentas para o sistema. Em [10] é possível obter um modelo para tal vazões, baseado em senoides de frequência 1/2800 Hz (ver equações 1 e 2). No entanto, é importante destacar que outros perfis de vazões podem ser implementados no sistema de emulação aqui proposto.

$$L_{in} = \bar{L}_{in} + 0,082 \sin \frac{2\pi}{2800} \quad (1)$$

$$G_{in} = \bar{G}_{in} + 0,075 \sin \frac{2\pi}{2800} \quad (2)$$

A Eq. 3 representa a taxa de variação do nível de líquido, que depende tanto dos fluxos de entrada e saída como de características como o comprimento e o diâmetro do cilindro,

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

A densidade da fase gasosa é dada pela Eq. 4,

$$\rho_G(t) = \frac{P(t)MM_G}{RT} \quad (4)$$

A variação na pressão é apresentada na Eq. 5, na qual é possível identificar que é influenciada não só pelo fluxo gasoso, mas também pelo fluxo de líquidos, pelo volume total e pelo volume instantâneo do cilindro,

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P(t)(G_{in}(t) - G_{out}(t) + L_{in}(t) - L_{out}(t))}{V - V_L(t)} \quad (5)$$

A vazão de saída de líquidos e gás é controlada diretamente pela taxa de abertura das válvulas de saída, como mostra as Eq. 6 e 7,

$$L_{out} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot x_L(t) \cdot C_{VL} \cdot \sqrt{\frac{P(t) - P_1}{\frac{\rho_L}{\rho_{H_2O}}}} \quad (6)$$

$$G_{out} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot x_G(t) \cdot C_{VG} \cdot \sqrt{\frac{[P(t) - P_2][P(t) + P_2]}{\frac{\rho_G}{\rho_{H_2O}}}} \quad (7)$$

Por fim, na Eq. 8, é descrito o volume instantâneo no interior do SB, de acordo com suas características geométricas,

$$V_L(t) = \frac{CD^2}{4} \left[\arccos \frac{D - 2h_L}{D} - 2 \frac{\sqrt{(D - h_L)h_L}}{D} \frac{D - 2h_L}{D} \right] \quad (8)$$

Emulação e validação da planta em malha aberta

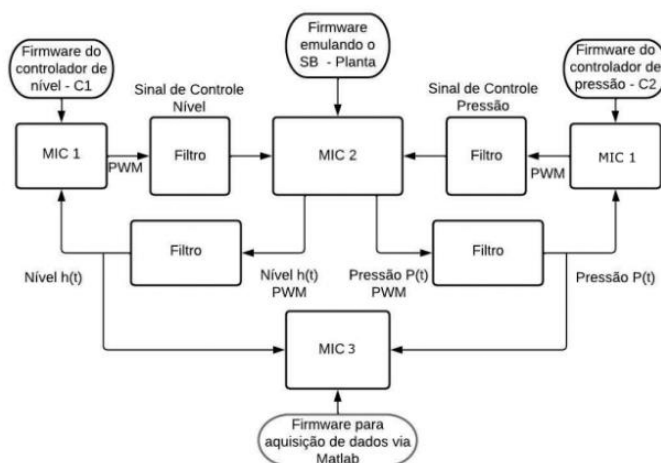
A emulação da planta em malha aberta se deu através de sua implementação em um microcontrolador ATMEGA 2560. Optou-se por este modelo por conta de sua ampla disponibilidade de portas analógicas e digitais, que seriam necessárias devido às interligações entre a planta, o controlador e o microcontrolador de aquisição de dados. Para tanto, foi desenvolvido um *firmware* onde as equações da planta discretizadas e todas as características da planta foram incluídas. Com isso, tendo como referência a planta simulada em diagrama de blocos, foi possível comparar os resultados a fim de validar o sistema em malha aberta. A validação se deu de forma análoga a [10], onde foram analisados três casos:

- Caso 1 (regime permanente): $x_L = 0,4375$ e $x_G = 0,0536$;
- Caso 2 (abertura de 14% de x_L): $x_L = 0,5$ e $x_G = 0,0536$;
- Caso 3 (abertura de 12% de x_G): $x_L = 0,4375$ e $x_G = 0,06$.

Implementação de dois controladores PI digitais e validação do sistema em malha fechada

De forma análoga à planta, foram implementados dois controladores, um para o nível e outro para a pressão, ambos reunidos em apenas um microcontrolador ATMEGA 2560, já que o mesmo possui uma ampla disponibilidade de entradas analógicas e saídas digitais.

Dessa forma a malha do sistema foi fechada e os resultados foram comparados com a simulação em diagrama de blocos em malha fechada, com os mesmos ganhos aplicados aos controladores. A Fig. 2 mostra um diagrama esquemático do sistema em *HiL* como um todo.

Figura 2 – Diagrama Geral do Sistema em *HiL*.

O objetivo dessa implementação foi observar a responsividade da planta a controladores, ou seja, validar a interação em tempo real de suas variáveis através das entradas e saídas analógicas e digitais dos microcontroladores. Dessa forma, para essa tarefa, os controladores foram ajustados de forma empírica, sem se ater às metodologias de projeto de controladores.

Para ambos os controladores foram implementadas as ações proporcional e integral (PI), com os ganhos definidos de forma empírica.

Resultados e Discussão

Nesta seção os resultados obtidos através do processo metodológico descrito na seção anterior são apresentados.

Validação da Planta em Malha Aberta via *HiL*

Na Fig. 3a observa-se o comportamento da planta em malha aberta para o caso 1. O padrão oscilatório na pressão e no nível deve-se ao fluxo de entrada com golfadas. Sem ação de controle, a pressão oscilou em amplitude fixa e o nível do tanque tendeu a zero. Quando o nível do tanque anulou, ocorreu indeterminação matemática por divisão por zero, substituindo $h_L(t)$ por zero na Eq. 3. No caso 2, ao abrir mais a válvula de saída de líquidos, o nível do tanque caiu mais rápido e a indeterminação surgiu em torno de 1400 s (Fig. 3b).

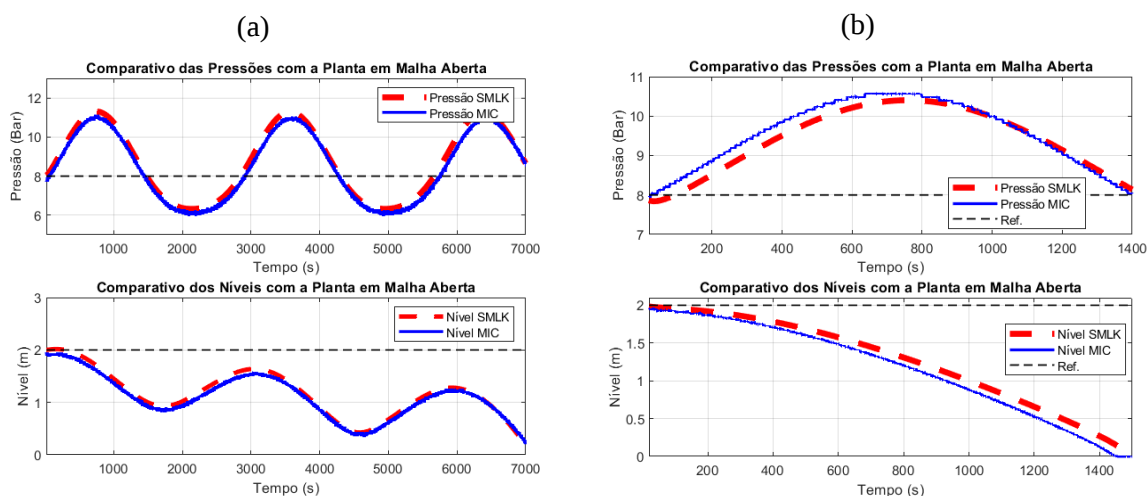


Figura 3 – Simulação em Malha Aberta – Casos 1 e 2.

No caso 3, com aumento de 12% na taxa de abertura da válvula de gases, houve tendência de aumento no nível do reservatório (Fig. 4). A planta em HiL apresentou resultados similares as simulações.

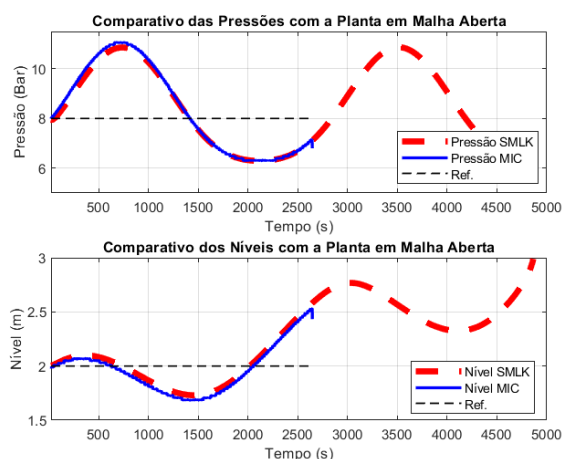


Figura 4 – Simulação em Malha Aberta – Caso 3.

Emulação do sistema com controlador PI em *HiL*

Após a validação da planta, os dois controladores foram incluídos, fechando a malha. Os resultados obtidos são apresentados a seguir. A Fig. 5a mostra o nível sob a ação do controlador e a ação de controle sobre a válvula de saída de líquidos. Nota-se que o SB, sob ação do controlador PI, seguiu a referência de 2 m, com margem de erro de 1,12%. Na Fig. 5b observa-se o comportamento da pressão interna sob o controlador PI, seguindo a referência de 8 bar, com margem de erro de 1,17%, evidenciando a ação de controle integral.

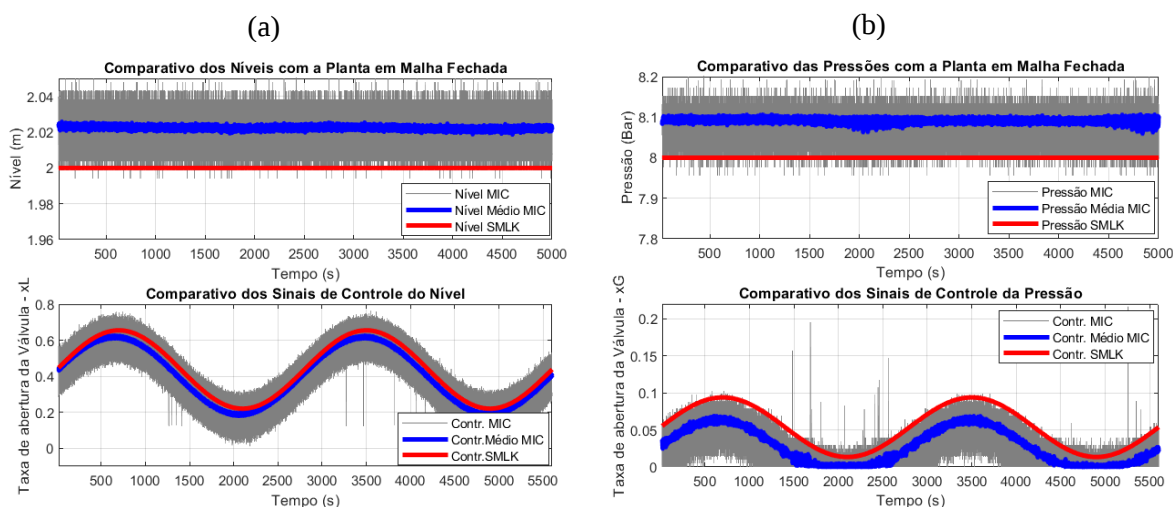


Figura 5 – Simulação em malha fechada.

Em ambos os casos foi possível identificar que as válvulas atuaram no sentido de compensar os efeitos que as golfadas impunham ao sistema, evidenciando a ação do controle proporcional.

As válvulas atuaram para compensar os efeitos das golfadas, mostrando a ação do controle proporcional. Analisando o sinal do controlador de pressão em HiL, identificou-se um erro relativo de 46%, possivelmente devido a dificuldades do microcontrolador com sinal PWM de pequenos valores, erros de leitura analógica ou limitação do filtro passa-baixas. O sinal de controle de nível manteve-se próximo ao sinal de referência, com erro relativo de 8,02%.

A Fig. 5 mostra que as variáveis controladas mantiveram erros percentuais próximos a 1%, enquanto as variáveis manipuladas apresentaram erro relativo maior, especialmente na abertura da válvula de gases.

Conclusões

Este trabalho focou na separação inicial de óleo e gás nas refinarias, implementando um sistema em HiL para testes no SB em malha aberta e fechada, mitigando desafios de flutuações de pressão e nível. O modelo do SB foi simulado no Simulink e validado no microcontrolador ATMEGA2560, com algoritmos de controle estabilizando a pressão e o nível. A abordagem HiL oferece uma ferramenta valiosa para o desenvolvimento de controladores para o SB, contribuindo para a otimização do refinamento ao reduzir interrupções. Futuros estudos podem aprimorar o sistema com microcontroladores e sistemas de aquisição de dados mais robustos, além de desenvolver uma placa de circuito impresso para interconexões mais confiáveis. Outra possibilidade é avaliar outros tipos de perturbações possíveis no sistema, além de testar outras estruturas de controle.

Este trabalho destacou a importância das simulações HiL e dos sistemas de controle no processamento primário de óleo e gás, especificamente nos separadores bifásicos, contribuindo para a eficiência e estabilidade do processo na indústria petrolífera.

Referências Bibliográficas

- [1] T. S. de Melo Ireno, Aplicação da metodologia model-based design no projeto e teste de sistemas de controle, Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas, 2014.
- [2] A. B. C. de Farias, R. S. Rodrigues, A. Murilo, R. Lopes, S. Avila, “Low-cost Hardware-in-the-Loop platform for embedded control strategies simulation”, vol. 4, pp. 1–15, 2016.
- [3] J.Sobota, N.Goubej, J.Konimarková, M.Cech, “Raspberry Pi-based HIL simulators for control education”, IFAC - Papers Online, vol. 52, pp. 68–73, 2019.
- [4] S. Seidi, A. Eftekhari, A. Khusro, S. R. Heris, K. M. U. Sahibzada, M. Gajdács, “Simulation and modeling of physiological processes of vital organs in education”, Journal of King Saud University, pp. 1–16, 2021.
- [5] L. Korn, D. Ruschen, N. Zander, S. Leonhardt, M. Walter, “Real-Time ECG Simulation for Hybrid Mock Circulatory”, Artificial Organs, pp. 131–140, 2017.
- [6] Petrobrás, Processamento Primário de Petróleo, Universidade Petrobrás, Rio de Janeiro, RJ, BR, 2007.
- [7] M. Stewart, K. Arnold, Gas-Liquid and Liquid Liquid Separators, Elsevier, 2008.
- [8] G. C. Nunes, J. L. de Medeiros, O. de Queiroz Fernandes Araújo, Modelagem e Controle na Produção de Petróleo - Aplicações em MATLAB, Blucher, São Paulo, SP, BR, 2010.
- [9] T. Mayor, V.Ferreira, A. Pinto, J. Campos, International Journal of Heat and Fluid Flow, pp. 1039–1053, 2008.
- [10] R. Trentini, A. Campos, M. A. Salvador, Y. M. Scheuer, C. H. F. dos Santos, “Unrestricted Horizon Predictive Controller Applied in a Biphasic Oil Separator under Periodic Slug Disturbances”, Processes, pp. 1–18, 2023.