



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

Yuri Matheus Scheuer, Marcos Antônio Salvador, Rodrigo Trentini

Instituto Federal de Santa Catarina

Câmpus Jaraguá do Sul – Rau – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

e-mail: yurischeuer@gmail.com, marcos.salvador@ifsc.edu.br, rodrigo.trentini@ifsc.edu.br

Trabalho de Conclusão de Curso – 29/06/2023

Resumo – A primeira fase de refinamento do petróleo nas plantas de produção é dedicada a realizar a separação do óleo, do gás e da água, oriundos dos poços de exploração, dando a devida destinação para cada elemento. Nesse contexto, utiliza-se o separador bifásico (SB), que é responsável por realizar a separação inicial entre as fases líquida e gasosa. Por conta das características de escoamento do fluxo de entrada, o SB é frequentemente submetido a oscilações de pressão e nível que, se não forem controladas, podem levar à interrupção de todo o processo. Partindo desse pressuposto, o presente trabalho propõe realizar a implementação da planta desse sistema em *Hardware-in-the-Loop (HiL)*, oferecendo uma ferramenta para a realização de testes e para o desenvolvimento de controladores. O modelo do SB foi, inicialmente, simulado em diagrama de blocos no simulador *Simulink*® e, em seguida, no microcontrolador ATMEGA2560, onde foi validado com base na simulação. Após a validação, a malha do sistema foi fechada com controladores nas válvulas de saída, que foram capazes de estabilizar a pressão e o nível no separador.

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

IMPLEMENTATION OF A MICROCONTROLLER-BASED BIPHASIC OIL AND GAS SEPARATOR FOR CONTROL SYSTEM TESTING VIA *HIL*

Abstract – The first phase of oil refining in production plants is dedicated to separating oil, gas, and water from exploration wells, providing the appropriate treatment for each element. In this context, it is found the biphasic separator (BS), which is responsible for the initial separation between the liquid and gas phases. Due to the flow characteristics of the input stream, the BS is often subjected to pressure and level oscillations that, if not controlled, can interrupt the entire process. Based on this assumption, this study is proposing the implementation of the plant for this system in *Hardware-in-the-Loop (HiL)*, offering a tool for testing and controller development. The BS model was

initially simulated using block diagrams in the *Simulink*® simulator and then on the ATMEGA2560 microcontroller, where it was validated based on the simulation. After validation, the system loop was closed with controllers on the output valves, which were able to stabilize the pressure and level in the separator.

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

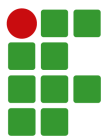
I. INTRODUÇÃO

Para auxiliar na compreensão de fenômenos físicos, em aplicações científicas e de engenharia, são desenvolvidos modelos matemáticos que os descrevem e que frequentemente envolvem equações diferenciais [1]. Partindo de tais descrições, é possível codificá-las e simular o comportamento dos fenômenos, de forma digital e em tempo real - Simuladores Digitais de Tempo Real (SDTR). Quanto maior for a riqueza de detalhes levados em consideração nas equações de um determinado sistema ou fenômeno físico, mais fidedigna deverá ser a sua representação digital [2].

Sob o aspecto de simulações em tempo real, há um destaque para a utilização da ferramenta conhecida como *Hardware in the Loop (HiL)*, onde modelos de sistemas são codificados e implementados em dispositivos digitais, como computadores, microcontroladores (MIC's) e controladores lógicos programáveis (CLP's), por exemplo. Por meio de interações entre entradas e saídas analógicas e digitais, os dispositivos são capazes de emular o comportamento dinâmico do sistema de interesse. Portanto, a principal vantagem desta ferramenta é que, ao utilizá-la, não é necessário que se disponha de uma planta física para que o sistema de controle seja projetado, basta que seu modelo seja conhecido [2].

Tanto em ambientes acadêmicos como em industriais, o *HiL* vem se mostrando como uma ferramenta importante, pois facilita o acesso à análise de sistemas de elevada complexidade, reduz custos, proporciona a realização de testes sob condições extremas de forma segura e, por fim, contribui para que o projeto e desenvolvimento de controladores seja mais ágil e preciso [3].

Outra contribuição importante que as técnicas de SDTR oferecem, além das supracitadas, é oferecer recursos didáticos



no ensino de sistemas de controle. Dada a comum dificuldade de acesso para realizar atividades de controle em sistemas reais, técnicas como o *HiL* ajudam os estudantes de engenharia a terem uma experiência de aprendizado mais completa, permitindo a exploração de diversos horizontes, deixando-os mais preparados para os desafios futuros em suas carreiras [4].

A aplicabilidade desse formato de simulação digital é muito abrangente, já que pesquisadores de diversas áreas de estudo têm feito publicações de estudos em que ele é utilizado. Em [5], por exemplo, os autores fizeram uma revisão de estudos relacionados à bioengenharia, especificamente na simulação de modelos fisiológicos de órgãos vitais de seres humanos, o que é conhecido como “órgãos-em-chip”. Ainda nessa linha de pesquisa, em [6] é apresentada uma aplicação do *HiL* na simulação fisiológica de um coração, ressaltando a importância dessa técnica quanto ao seu potencial para reduzir a necessidade de testes em animais, que, além de serem eticamente questionáveis, são custosos e demorados.

Em estudos voltados para a engenharia elétrica, encontram-se pesquisas utilizando técnicas de SDTR em diversos segmentos, como em [7], onde os autores desenvolveram um conversor multifuncional, com controlador aplicado via *HiL*, responsável por integrar um sistema fotovoltaico com baterias à rede elétrica. Em [8], os autores desenvolveram uma plataforma para testar controladores de circuitos de potência utilizando *HiL*, validando-a através de duas aplicações conhecidas: o conversor boost e a ponte H. Já em [9], os autores exploraram a utilização de uma plataforma de *HiL*, para realizar testes com simulações em tempo real de sistemas de geração eólica.

No setor de óleo e gás, a utilização de técnicas de simulação em tempo real tem contribuído no desenvolvimento de algumas pesquisas, como em [10], onde os autores propuseram a investigação da implementação de um controlador preditivo de horizonte infinito a um sistema de bombeamento submerso de óleo e gás, validando-o através do *HiL* com o microcontrolador ESP32. Enquanto em [11], numa aplicação similar à proposta no presente artigo, as autoras desenvolveram um simulador de um separador bifásico (SB), integrando um *software* de supervisão de processos, um *software* de simulação matemática e um controlador lógico programável (CLP). Nesse caso, com a utilização de um modelo matemático real e do método de simulação *HiL*, foi possível implementar um controlador e realizar testes de procedimentos praticados em plantas reais.

O SB é, normalmente, o primeiro cilindro de separação do denominado “processamento primário”, que dá a devida destinação aos fluidos que chegam na plataforma através dos dutos de elevação [12]. A composição desses fluidos, oriundos dos poços de petróleo, consiste em uma fase líquida, contendo água e óleo, e em uma fase gasosa, tipicamente coposta por Metano, Butano, Etano, Propano e Pentano [13]. Segundo [14], a separação desses componentes cumpre, essencialmente, três finalidades: promover a separação óleo/gás/água, a adequação das fases para aplicações comerciais e o processamento para o descarte ambientalmente seguro dos subprodutos gerados no

processo. De maneira complementar, em [15] os autores citam a importância de realizar a separação das fases logo no início do processo, para que sejam obtidos fluxos de fase única para a posterior distribuição através de bombas e compressores.

A fim de evitar gargalos que reduziram a capacidade de produção de toda a cadeia de processamento, é imprescindível que o SB conte com sistemas de controle de nível e pressão, atuando sobre as respectivas válvulas de saída [13]. Com tamanha importância que os sistemas de controle exercem sobre essa cadeia de processamento e, não obstante, com as potenciais contribuições que os SDTR têm a oferecer para esse segmento, observou-se a oportunidade de emular esse sistema utilizando a técnica *HiL*. Portanto, o objetivo principal do presente trabalho foi implementar o modelo de um SB em uma plataforma microcontrolada, a fim de viabilizar o desenvolvimento de sistemas de controle para essa planta. Para tanto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Obter o modelo matemático da planta (SB) através de pesquisa bibliográfica;
- Implementar o modelo matemático em diagrama de blocos no *software Simulink®*;
- Discretizar o sistema;
- Implementar o sistema em microcontroladores;
- Desenvolver o *firmware* da planta para o MIC;
- Implementar o *firmware* de controle das válvulas em um MIC;
- Implementar um filtro passa-baixas para a leitura dos sinais PWM dos MIC's;
- Registrar e analisar os resultados obtidos através do *HiL*, comparando-os com os resultados de simulação.

Este trabalho foi dividido entre as seguintes seções: II Fundamentação teórica, III Materiais e métodos e IV Resultados.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, são apresentados os principais conceitos teóricos utilizados no trabalho.

A. Processamento Primário

No processo de extração de petróleo em alto mar, nos dutos de elevação (*risers*), ocorre o chamado escoamento multifásico, que é composto por uma mistura de água, óleo e gás. Uma das principais características dessa mistura é um comportamento oscilatório, caracterizado pelo fluxo de gás e líquido em golfadas, que podem influenciar em diversos processos da cadeia produtiva das plataformas [16].

Como o interesse comercial tem foco na produção de óleo e gás, é necessário que os campos de produção estejam equipados com instalações destinadas a processar os fluidos, de forma a dar a correta destinação a eles. Um diagrama esquemático simplificado do processamento primário é mostrado na Fig. 1, no qual é possível identificar as diversas etapas que envolvem o processamento primário. Primeiro a matéria prima bruta entra

no sistema através de um “manifold de coleta”, que a insere no separador de gás e líquido, o SB. O substrato líquido passa ainda por outros dois estágios de separação da mistura de água e óleo. Por fim, a água passa por um tratamento final, pelo qual é condicionada para a injeção no reservatório ou para o descarte. O óleo, por sua vez, é armazenado e destinado para o processo de refinamento [12].

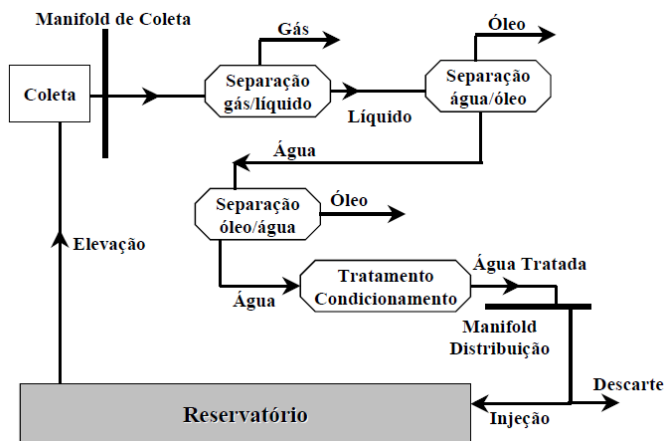


Fig. 1. Processamento primário de óleo e gás: esquema simplificado [12].

O escopo do presente trabalho limita-se à primeira etapa do processamento primário, o separador bifásico de óleo e gás.

B. Separador Bifásico de Óleo e Gás

Numa instalação de processamento primário, inicialmente o gás, que apresenta menor densidade relativa, é separado dos líquidos através da ação da gravidade. Esse fenômeno ocorre no primeiro estágio, conhecido como “separador bifásico”, que, por sua vez, conta com algumas seções de separação, como mostra a Fig 2. Inicialmente, o fluido choca-se com dispositivos defletores que alteram bruscamente a velocidade e a direção do fluxo, direcionando a maior parte dos elementos líquidos para o fundo do reservatório; a partir desse momento, na seção de sedimentação por gravidade, ocorre a decantação das gotículas maiores de óleo presentes na fase gasosa. Não obstante, o fluxo gasoso ainda retém algumas partículas pequenas de óleo que são capturadas ao forçar a passagem do gás através de meios porosos, na seção de aglutinação, que fica junto à saída de gás [12].

A partir desse primeiro processo de separação, os elementos líquidos e gasosos são destinados às etapas seguintes do processamento por meio das respectivas válvulas de saída [12].

C. Fluxo Multifásico em Golfadas

O fluxo em golfadas é caracterizado pela formação de bolhas de gás alongadas dentro de uma determinada tubulação. Essas bolhas com formatos que remetem a projéteis, conhecidas como “bolhas de Taylor”, ocupam a maior parte da seção transversal dos dutos, fazendo com que os líquidos fluam em volta delas,

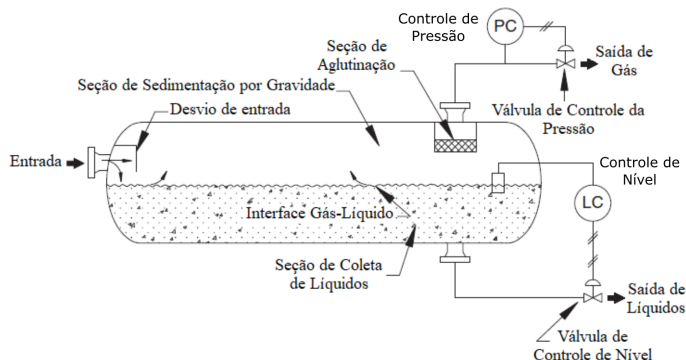


Fig. 2. Separador bifásico horizontal. Adaptado de [17]

em direção oposta, conforme mostra a Fig. 3 [17]. A formação dessas bolhas ocorre, basicamente, devido à tendência de ocorrer a acumulação de líquidos nas partes mais baixas da tubulação. Quando o nível de líquidos nessas partes aumenta a ponto de bloquear o fluxo de gás, o gás força a sua passagem, formando uma bolha revestida por um filme fino líquido [13].

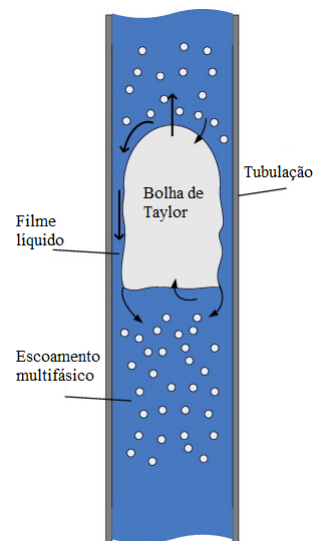
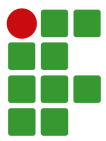


Fig. 3. Bolha de Taylor formada em um escoamento multifásico. Adaptado de ?.

As golfadas podem trazer consigo grandes volumes de líquidos, causando elevações abruptas no nível do SB. Dessa forma, a identificação desse fluxo turbulento deve ser levada em consideração na fase de projeto do SB, pois é necessário estabelecer um limiar entre o nível de operação e o nível de desligamento, de forma que o cilindro seja capaz de acomodar essa elevação sem interromper o processo [13].

D. Sistema de Controle Digital

Enquanto as aplicações de sistemas de controle clássico, onde as entradas e saídas são analógicas, incluindo componentes elétricos e/ou mecânicos, são tratadas em base de tempo contínuo (analógico), nos sistemas de controle digital, as entradas e saídas são representadas em tempo discreto. Algumas



vantagens que essa abordagem proporciona são: flexibilidade, uma vez que as alterações e atualizações são geralmente questões de *firmware* e não de *hardware*; velocidade, devido à alta capacidade de processamento disponível atualmente; e preço, já que é possível implementar sistemas complexos, mesmo em microcontroladores de baixo custo [18].

A inserção de sistemas digitais nas malhas de controle inseriu novos elementos à estrutura de controle clássico, que tradicionalmente é composta por planta, sensor, controle e atuador. Para que um sistema físico seja controlado digitalmente, é necessário que os sinais analógicos, medidos pelos sensores, sejam convertidos em sinais digitais. Não obstante, os sinais digitais, enviados pelo controlador aos atuadores, devem ser convertidos em sinais analógicos. Portanto, a estrutura moderna de controle digital passou a contar também com computadores, algoritmos, microcontroladores e conversores AD e DA, por exemplo, conforme mostra a Fig. 4 [19].

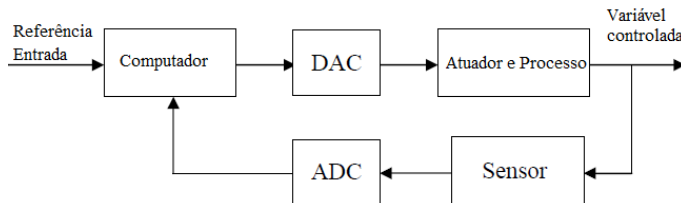


Fig. 4. Diagrama esquemático de um sistema de controle digital. Adaptado de [18].

E. Sistemas de Tempo Real

Os sistemas de controle digitais devem não somente ser precisos com relação às suas operações matemáticas, mas também com relação ao tempo em que seus resultados são disponibilizados. Essa é a principal característica dos sistemas de tempo real, que devem ser capazes de produzir, dado um período de tempo, os mesmos resultados que o sistema físico representado produziria [18].

Para viabilizar a implementação destes sistemas, as ferramentas de simulação têm fundamental importância. Ao passo que a tecnologia computacional evoluiu, tais ferramentas passaram a contar com recursos que possibilitaram a expansão dos horizontes de testes em laboratório. Atualmente, é possível simular comportamentos de sistemas de alta complexidade em plataformas digitais, o que torna possível, por exemplo, a realização de ensaios sob condições severas, que podem ser danosos aos sistemas físicos [20].

No caso do SB, especificamente, um sistema de controle ineficiente levaria o sistema a permitir elevações indesejadas no nível de líquidos. Nessa situação, por questões de segurança, o sistema é desligado (*shutdown*) antes que o óleo saia pela válvula de gás, o que prejudica a produtividade no processamento primário como um todo [13].

1) Processamento Digital de Sinais: Para que as características supracitadas possam ser garantidas, um dos principais critérios a serem levados em consideração é a amostragem do sinal analógico, que, segundo [21], consiste no princípio fundamental do processamento digital de sinais. Através desse processo, periodicamente são coletadas amostras de um sinal analógico, para que seja convertido em sinal digital. A frequência com que essas amostras são obtidas é chamada de frequência de amostragem.

Segundo o teorema de Nyquist-Shannon, para que um sinal analógico possa ser completamente reconstruído, a frequência de amostragem deve ser, pelo menos, duas vezes maior que a maior frequência do sinal de interesse [22]. Na prática, normalmente a frequência de amostragem escolhida é um pouco maior: 5 a 10 vezes maior que a maior frequência do sistema [18]. A Figura 5, ilustra a etapa de amostragem de um sinal analógico, onde é possível identificar as amostras do sinal em tempo discreto e o respectivo período de amostragem [23].

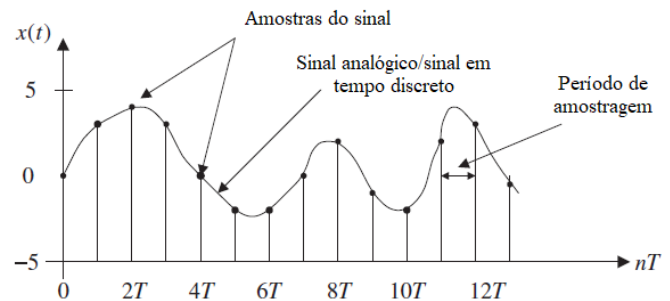


Fig. 5. Processo de amostragem de um sinal analógico [23].

A Figura 6, apresenta um panorama geral do processamento de sinais digitais: na primeira etapa, um sinal analógico é convertido em sinal digital, a partir de um conversor AD, primeiro um sinal analógico passa por um conversor AD, depois esse sinal é processado digitalmente e, por fim, o sinal analógico é reconstruído, através de um conversor DA como um sinal analógico [23].

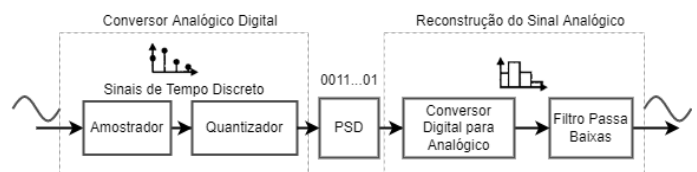
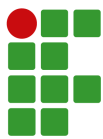


Fig. 6. Diagrama do processamento analógico-digital. Adaptado de [23].

As simulações de sistemas discretos, ou simulações digitais, podem ser síncronas (em tempo real), ou assíncronas (*offline*). A Figura 7 evidencia a diferença entre as simulações digitais (computação de $f(t)$) e as simulações em tempo contínuo (Clock Sim.). Nos diagramas de tempo “a” e “b”, são representadas as simulações assíncronas, nas quais a computação dos sistemas



discretos pode ser mais rápida ou mais lenta, em comparação com a simulação em tempo contínuo. Já no item “c”, a simulação em tempo discreto respeita os mesmos intervalos de tempo que ocorrem na simulação em tempo contínuo, de forma que o sistema digital seja equivalente ao sistema analógico em questão [24].

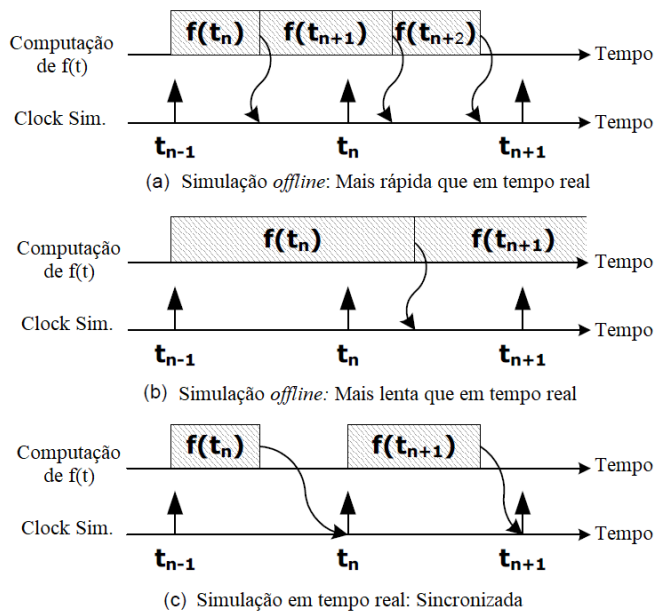


Fig. 7. Simulações *offline* x tempo real. Adaptado de [24].

F. Hardware-in-the-Loop

A técnica de simulação *HiL* é um tipo de simulação em tempo real, utilizada em projetos baseados em modelos. A proposta dessa abordagem de simulação consiste em utilizar um sistema de processamento em tempo real para criar uma representação virtual da planta a ser controlada, possibilitando projetar e testar o controlador a ser implementado no sistema físico. Além disso, é necessário dispor de um computador, para programar e fazer a aquisição dos sinais, e de um hardware de controle, para manter as variáveis de interesse dentro dos valores projetados [25].

Num sistema *HiL* é necessário, basicamente, que haja uma interconexão entre elementos como um *hardware* de desenvolvimento, um computador, por exemplo, um processador em tempo real, que é o *software* que faz a emulação da planta física e um *hardware* de controle, conforme mostra a Fig. 8 [25].

Para [2], um dos principais objetivos da utilização de ferramentas de SDTR é tornar o tempo da tarefa de desenvolver sistemas de controle o menor possível e com alto grau de confiabilidade. Neste contexto, o *HiL* está um passo além das simulações puramente virtuais e a um passo atrás dos testes realísticos [20].

Ficam evidenciadas, então, as oportunas contribuições que ferramentas de SDTR, como o *HiL*, têm a oferecer em sistemas complexos. No presente caso, sua aplicação não se restringe

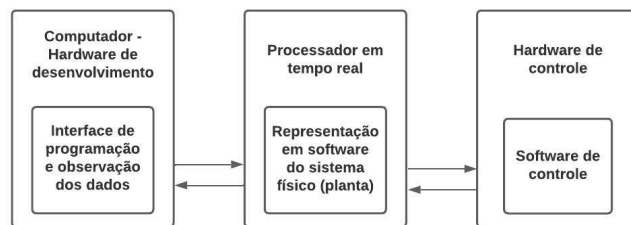


Fig. 8. Simulação *HiL*. Adaptado de [25].

somente ao desenvolvimento de sistemas de controle para as válvulas, mas também para que a própria estrutura do SB possa ser projetada, de forma que o sistema possa ser capaz de lidar com as perturbações características do processo de extração.

III. METODOLOGIA

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

- Pesquisa e análise da modelagem matemática de um SB horizontal;
- Implementação do modelo em forma de diagrama de blocos, utilizando o *software Simulink®*;
- Emulação da planta em um microcontrolador;
- Validação do sistema emulado em malha aberta;
- Implementação de dois controladores PI digitais, aplicados às válvulas de óleo e de gás do SB;
- Validação do sistema em malha fechada, com a aplicação dos controladores PI;
- Comparação dos resultados simulados através do *Simulink®*, com os resultados obtidos através da emulação da planta e dos controladores implementados em microcontroladores.

A. 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 [16], 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 Tabela II, por sua vez, apresenta os valores das principais variáveis em regime permanente.

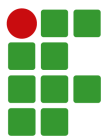


TABELA I

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	999,19	kg/m ³
P_1, P_2	Pressões à jusante do SB	6	bar
T	Temperatura da fase gasosa	303,15	K
MM_G	Massa molar do gás	0,021	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	56,60	m ³

TABELA II

Valores em regime permanente

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
$\bar{x}_L$	Taxa de abertura válvula liq.	0,4375	-
$\bar{x}_G$	Taxa de abertura válvula gás	0,0536	-
$\bar{L}_{in}$	Vazão de entrada liq.	0,165	m ³ /s
$\bar{L}_{out}$	Vazão de saída liq.	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 para o sistema. Essas vazões apresentam uma dinâmica lenta, conforme evidenciado nas equações 1 e 2, nas quais é possível identificar que a frequência das oscilações é de 1/2800 Hz:

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

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

A Equação 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 é controlada diretamente pela taxa de abertura da válvula de saída, como mostra a Eq. 6

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

De maneira semelhante, a Eq. 7 descreve a vazão de saída de gases

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

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

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

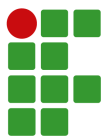
B. Implementação do modelo em diagrama de blocos no Simulink®

Através da ferramenta *Simulink®*, as equações, que compõem o modelo apresentado na subseção anterior, foram convertidas em formato de diagrama de blocos, utilizando os recursos matemáticos do *software*.

No Apêndice A é possível visualizar a planta do SB em malha aberta, representada por diagrama de blocos, no qual são identificadas as equações correspondentes.

A implementação das equações se inicia a partir da Eq. diferencial do nível, a Eq. 3, já que nela haviam elementos constantes, como o comprimento, o diâmetro do cilindro e o fluxo líquido de entrada. Além disso, o nível pode ser obtido a partir de uma integração direta da própria Eq. 3. O elemento restante era a Eq. 6, que por si trouxe um conjunto de outros elementos a serem implementados, como a Eq. diferencial da pressão (Eq.5). Assim, seguiu-se o processo de construção do modelo em diagrama de blocos até o final: expandindo as equações e respeitando a forma como elas se interrelacionavam umas com as outras.

A partir dessa etapa, foi possível ter uma referência do comportamento do SB em ambiente de simulação, observando o comportamento de suas saídas em regime permanente, sob efeito das golfadas e a partir de diferentes taxas de abertura das válvulas de saída.



C. 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. É possível visualizar o sistema como um todo, durante uma das capturas de dados em laboratório, no Apêndice B. Para tanto, foi desenvolvido um *firmware* onde as equações da planta discretizadas e todas as características da planta foram incluídas, conforme é possível identificar no Apêndice C.

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 à proposta em [26], onde foram analisados três casos:

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

D. 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 Figura 9, mostra um diagrama esquemático do sistema em *HiL* como um todo.

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.

IV. RESULTADOS

Nesta seção os resultados obtidos através do processo metodológico descrito na seção anterior são apresentados. Inicialmente são apresentados os resultados de validação da planta *HiL* em malha aberta. Em seguida são apresentados os resultados de duas implementações de controladores para a planta, um controlador clássico PI e um controlador LQR.

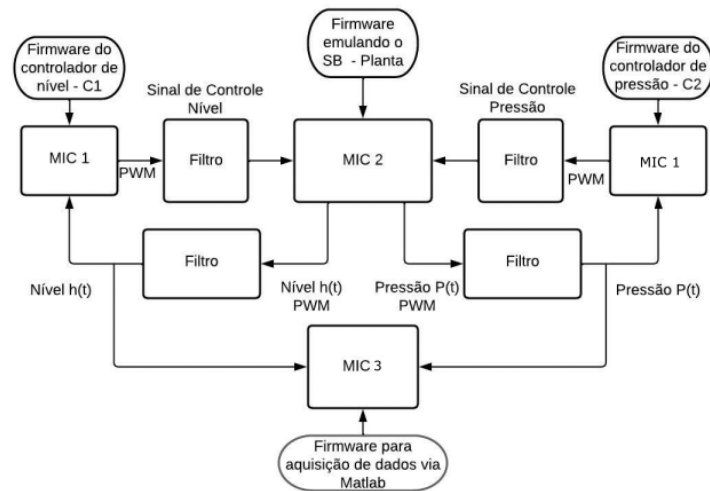


Fig. 9. Diagrama Geral do Sistema em *HiL*.

TABELA III

Ganhos dos controladores

Ganho	Valor	Descrição
kp_n	-10,0	ganho proporcional nível
Ti_n	10,0	ganho integral nível
kp_p	-2,5	ganho proporcional pressão
Ti_p	0,5	ganho integral pressão

A. Validação da Planta em Malha Aberta via *HiL*

Na Figura 10 é possível observar o comportamento da planta quando está em malha aberta para o caso 1. O padrão oscilatório observado, tanto na pressão quanto no nível, deve-se à característica do fluxo de entrada do sistema com as golfadas. Com a correspondente configuração de abertura das válvulas, sem ação de controle alguma, observou-se que a pressão permaneceu a oscilar em uma amplitude fixa, enquanto o nível do tanque também oscilou, mas tendeu a zero. No momento em que se anulou o nível do tanque, começou a ocorrer no sistema uma indeterminação matemática caracterizada, nesse caso, por uma divisão por zero, conforme é facilmente identificável ao substituir o nível $h_L(t)$ por zero na Eq. 3.

Ao simular uma abertura maior da válvula de saída de líquidos, no caso 2, como intuitivamente era esperado, constatou-se que o nível do tanque começou a cair de forma mais acelerada e, por consequência, o sistema apresentou a indeterminação já em torno de 1400 s, conforme pode ser observado na Fig. 11.

Em seguida, no caso 3, ao simular um aumento de 12% na taxa de abertura da válvula de gases, foi identificada uma tendência de aumento no nível do reservatório.

Nesse caso, as capturas dos gráficos feitas através do sistema *HiL* limitavam-se a 2600 s, sendo que, após esse período, subitamente os sinais eram anulados. Não foi possível levantar com precisão o motivo dessa falha. Ao observar os

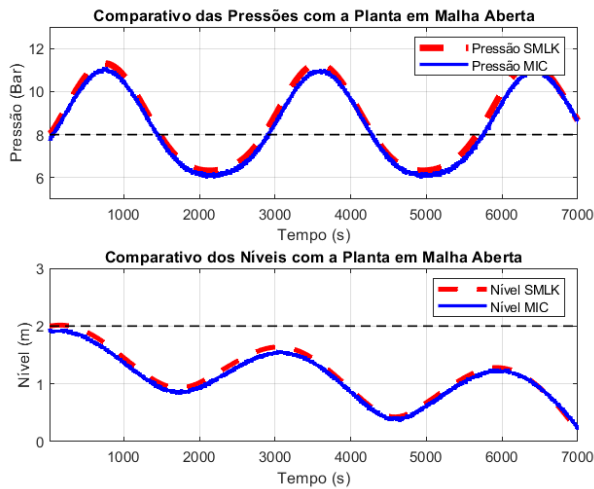
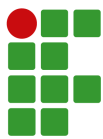


Fig. 10. Simulação em Malha Aberta - Caso 1: $x_L = 0,4375$ e $x_G = 0,0536$.

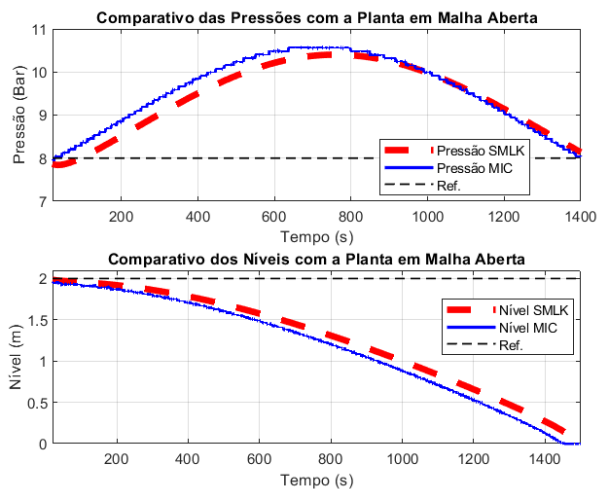


Fig. 11. Simulação em Malha Aberta - Caso 2: $x_L = 0,5$ e $x_G = 0,0536$.

resultados do *Simulink*®, observa-se que, nessa condição de abertura das válvulas, o nível de líquidos se equipararia ao diâmetro do separador, ou seja, haveria um transbordamento, em aproximadamente 4800 s, conforme mostra a Fig. 12. Esse transbordamento representa outra indefinição matemática no sistema na Eq. 3, já que o denominador é anulado por não haver diferença entre o nível instantâneo e o diâmetro do cilindro.

Apesar da limitação ocorrida no caso 3, foi possível identificar que a planta implementada em *HiL* apresentou resultados similares aos que ocorreram nas simulações.

B. Emulação do sistema com controlador PI em *HiL*

Após a validação da planta ser concluída, os dois controladores foram incluídos no sistema, fechando-se a malha. Os resultados obtidos, conforme os ganhos mencionados na

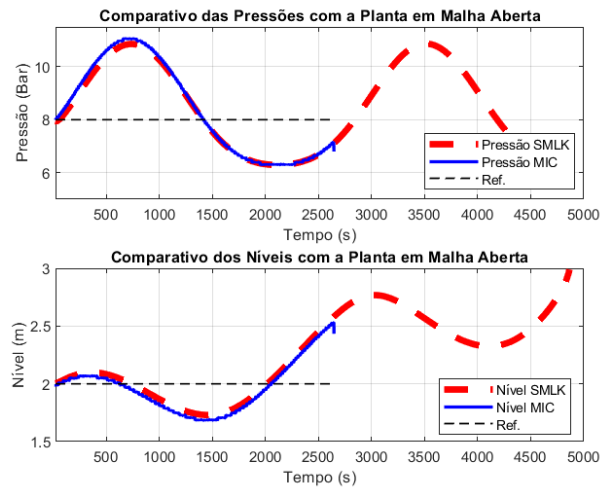


Fig. 12. Simulação em Malha Aberta - Caso 3: $x_L = 0,4375$ e $x_G = 0,06$.

Tab. III, são apresentados a seguir.

A Figura 13 mostra o nível sob a ação do controlador e a respectiva ação de controle sobre a válvula de saída de líquidos.

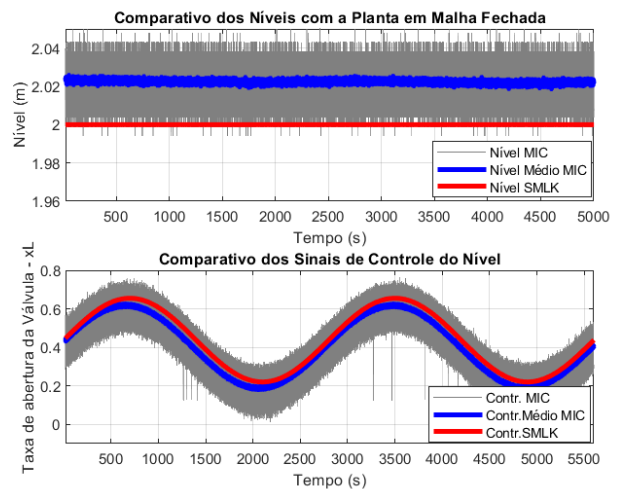


Fig. 13. Simulação Controlador PI - Nível.

Nota-se que o SB, sob a ação do controlador PI sobre a válvula de líquidos, conseguiu seguir a referência de 2 m, com uma margem de erro de 1,12%. De forma análoga, na Fig. 14, é possível observar o comportamento da pressão interna sob o efeito das ações do controlador PI. Observou-se neste caso também que a pressão seguiu a referência de 8 bar, com uma margem de erro de 1,17%, evidenciando a ação de controle integral.

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.

Analisando o sinal do controlador da pressão implementado em *HiL*, de forma comparativa com o simulador, identificou-

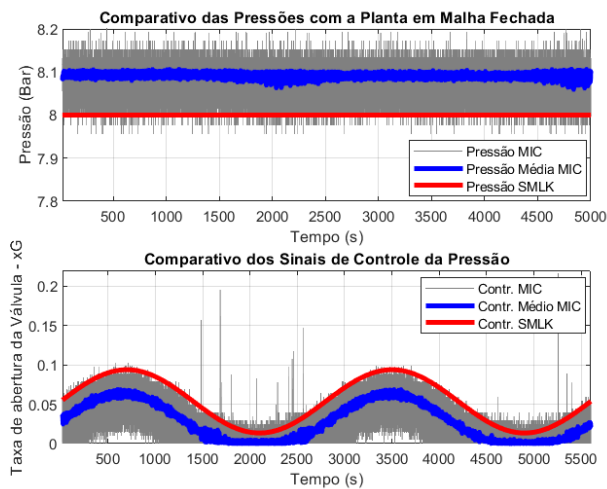
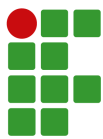


Fig. 14. Simulação Controlador PI - Pressão.

se um erro relativo de aproximadamente 46%. Dentre as possibilidades para explicar esse comportamento, acredita-se que o microcontrolador tenha tido dificuldades de lidar com o sinal PWM de pequenos valores, que em determinados momentos passavam a assumir valor nulo, o que acabaria reduzindo o nível médio do sinal de controle. Por consequência disso, a diferença com relação ao sinal de referência seria maior. Outras possibilidades elencadas seriam possíveis erros nas leituras analógicas ou até mesmo uma limitação do filtro passa-baixas. Para identificar com maior certeza a fonte do erro, caberia realizar mais testes isolando cada uma dessas possibilidades.

O sinal de controle de nível, por sua vez, manteve-se próximo ao sinal de referência, com um erro relativo de 8,02%. Nesse caso, como a amplitude do sinal de controle foi maior, os microcontroladores não tiveram dificuldades de transmitir o sinal PWM nem de realizar as leituras analógicas correspondentes.

Os erros médios identificados, comparando os dados do sistema emulado com os da simulação de referência, são apresentados na Tab. IV.

TABELA IV
Erros médios

Erro relativo	(%)
Nível no interior do SB	1,12%
Controle da válvula de líquidos	8,02%
Pressão no interior do SB	1,17%
Controle da válvula de pressão	46,13%

Conforme é possível observar, tanto nas Figs. 13 e 14, quanto nos resultados da Tab. IV as variáveis controladas mantiveram erros percentuais próximos a 1 %. As variáveis manipuladas, por sua vez, apresentaram um erro relativo maior, especialmente a abertura da válvula de gases, conforme comentado anteriormente.

C. Emulação do sistema com controlador LQR em HiL

A fim de validar uma plataforma *online*, desenvolvida para auxiliar no projeto de controladores baseados em espaço de estados, [27] utilizou o sistema desenvolvido no presente trabalho, fechando a malha com um controlador LQR, que é uma aplicação moderna de sistemas de controle em espaços de estados. As Figuras 15 e 16, a seguir, mostram os resultados obtidos pelos autores para o controle do nível e da pressão, respectivamente.

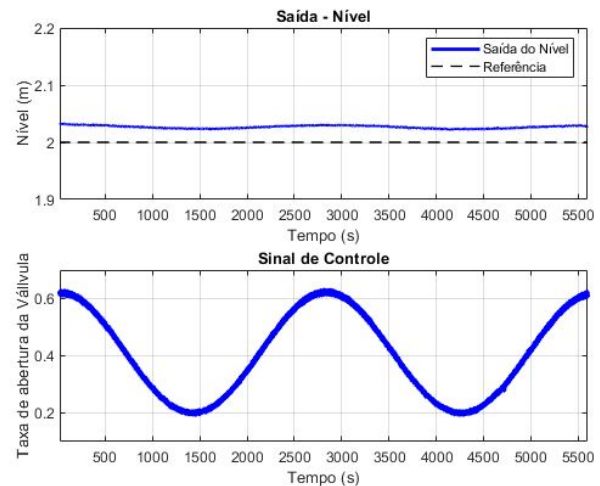


Fig. 15. Controlador LQR - Nível [27].

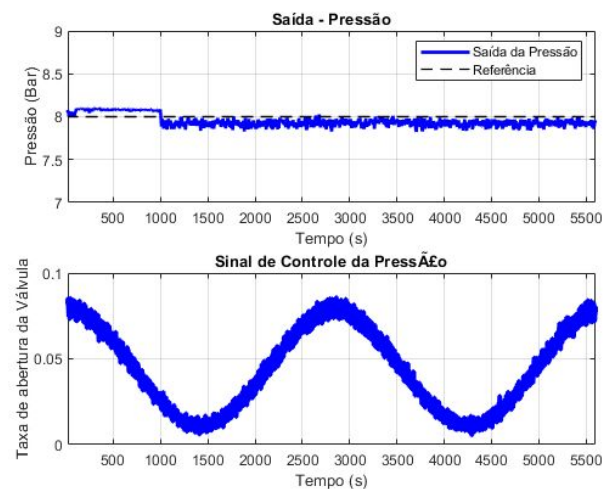


Fig. 16. Controlador LQR - Pressão [27].

Observando o sinal de controle na Fig. 16, identifica-se que, neste caso, o sistema de aquisição de dados não teve problemas em lidar com pequenas amplitudes. Seria pertinente, em trabalhos futuros, analisar com maior rigor as capturas com os dois controladores.

Esses resultados, que indicam êxito na implementação dos controladores LQR, auxiliam na validação do sistema



desenvolvido no presente trabalho, não só para a utilização com controladores clássicos, mas com controladores modernos também.

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho concentrou-se no processo inicial de separação de óleo e gás, que ocorre nas refinarias de petróleo. A implementação de um sistema em *HiL*, possibilitando testes no SB, tanto em malha aberta quanto em malha fechada, teve interesse de mitigar os desafios associados com as flutuações de pressão e nível, decorrentes do fluxo de entrada. O modelo do SB foi inicialmente simulado utilizando o *software Simulink®* e, posteriormente, implementado e validado no microcontrolador ATMEGA2560. Seguidos da validação, foram implementados algoritmos de controle nas válvulas de saída, visando estabilizar a pressão e o nível no interior do separador. A abordagem *HiL* apresentada neste trabalho oferece uma ferramenta valiosa para o desenvolvimento de controladores para o SB. Ao fechar a malha e manter as variáveis de pressão e nível controladas, o presente estudo contribui também para a otimização do processo de refinamento, ao possibilitar que as operações ocorram com menos interrupções não programadas.

Futuros estudos podem aprimorar o sistema, sanando as dificuldades encontradas ao utilizar microcontroladores e sistemas de aquisição de dados mais robustos. Além disso, outra perspectiva de continuidade seria desenvolver uma placa de circuito impresso embarcando todo o sistema, proporcionando interconexões mais confiáveis entre os elementos que o compõe.

O presente trabalho destacou a importância das simulações via *HiL* e dos sistemas de controle no processamento primário de óleo e gás, especificamente no contexto dos separadores bifásicos. Os resultados aqui apresentados podem contribuir de maneira prática para a indústria petrolífera, agregando ferramentas para contribuir para o aumento da eficiência e garantindo a estabilidade do processo.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Nagel, E. B. Saff, A. D. Snider, *Equações diferenciais*, 8a ed., Pearson Education do Brasil, São Paulo, SP, BR, 2012.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] J. Sobota, N. Goubaj, J. Konimarková, M. Cech, “Raspberry Pi-based HIL simulators for control education”, *IFAC - Papers Online*, vol. 52, pp. 68–73, 2019.
- [5] S. Seidi, A. Eftekhari, A. Khusro, S. R. Heris, K. M. U. Sahibzada, M. Gajdacs, “Simulation and modeling of physiological processes of vital organs in education”, *Journal of King Saud University*, pp. 1–16, 2021.
- [6] L. Korn, D. Ruschen, N. Zander, S. Leonhardt, M. Walter, “Real-Time ECG Simulation for Hybrid Mock Circulatory”, *Artificial Organs*, pp. 131–140, 2017.
- [7] D. C. Júnior, J. G. Oliveira, P. M. de Almeida, C. Bostrom, “Control of a multi-functional inverter in an AC microgrid - Real-time simulation with control hardware in the loop”, *Electric Power Systems Research*, pp. 201–212, 2019.
- [8] B. Lu, X. Wu, H. Figueroa, A. Monti, “A Low-Cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Controls”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, pp. 919–931, 2007.
- [9] H. Li, M. Steurer, S. Woodruff, D. Zhang, “Development of a Unified Design, Test, and Research Platform for Wind Energy Systems Based on Hardware-in-the-Loop Real-Time Simulation”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, pp. 1144–1151, 2006.
- [10] B. A. Santana, R. Fontes, M. A. Martins, “Controlador Preditivo de Horizonte Infinito Embarcado: Aplicação Hardware-In-The-Loop a um Sistema de Bombeio Centrífugo Submerso”, *XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 850–856, 2021.
- [11] J. K. Araujo, M. G. Gomes, *Desenvolvimento de um simulador de vaso separador bifásico, óleo e gás, aplicando a técnica de simulação hardware in the loop*, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - Campus Campos Centro, 2017.
- [12] Petrobrás, *Processamento Primário de Petróleo*, Universidade Petrobrás, Rio de Janeiro, RJ, BR, 2007.
- [13] M. Stewart, K. Arnold, *Gas-Liquid and Liquid-Liquid Separators*, Elsevier, 2008.
- [14] F. Flores-Bugacho, J. Guerrero, J. Llanos, D. Ortiz-Villalba, A. Navas, P. Velasco, “Development and Application of a Virtual Reality Biphasic Separator as a Learning System for Industrial Process Control”, *Electronics*, 2022.
- [15] C. Backi, B. A. Grimes, S. Skigestad, “A Control - and Estimation- Oriented Gravity Separator Model for Oil and Gas Applications Based upon First-Principles”, *Industrial Engineering Chemistry Research*, pp. 7201–7217, 2018.
- [16] G. C. Nunes, J. L. de Medeiros, O. de Queiroz Fernandes Araújo, *Modelagem e Controle na Produção de Petróleo - Aplicações em MATLAB*, Blusher, São Paulo, SP, BR, 2010.
- [17] T. Mayor, V. Ferreira, A. Pinto, J. Campos, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, pp. 1039–1053, 2008.
- [18] M. S. Fadali, A. Visioli, *Digital Control Engineering - Analysis and Design*, Elsevier, 2013.



- [19] A.Gambier, “Real-time Control Systems: A Tutorial”, pp. 1024–1031, 2004.
- [20] P. Sarhadi, S. Yousefpour, *International Journal of Dynamics and Control*, pp. 470–479, 2014.
- [21] A. S. Sedra, K. C. Smith, *Microeletrônica*, 4 ed., Pearson Makron Books, São Paulo, SP, BR, 2000.
- [22] C. E. Shannon, “Communication in the Presence of Noise”, *Proceedings of the IRE*, pp. 10–21, 1948.
- [23] J. Jiang, L. Tan, *Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications*, Elsevier, Waltham, MA, USA, 2013.
- [24] J.Bélanger, P.Venne, J.Paquin, “The What, Where and Why of Real-Time Simulation”, *Planet RT*, pp. 37–49, 2010.
- [25] Mathworks, “Basics of Hardware-In-The-Loop simulation”, Accessed: 2022-08-5, 2022, URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/what-is-hardware-in-the-loop-simulation.html>.
- [26] 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.
- [27] A. A. do Espírito Santo Junior, A. A. de Melo, R. Trentini, *Plataforma Online Para Desenvolvimento de Controladores Baseado em Espaço de Estados, com Aplicação em Arduino*, Instituto Federal de Santa Catarina, 2023.



APÊNDICE A

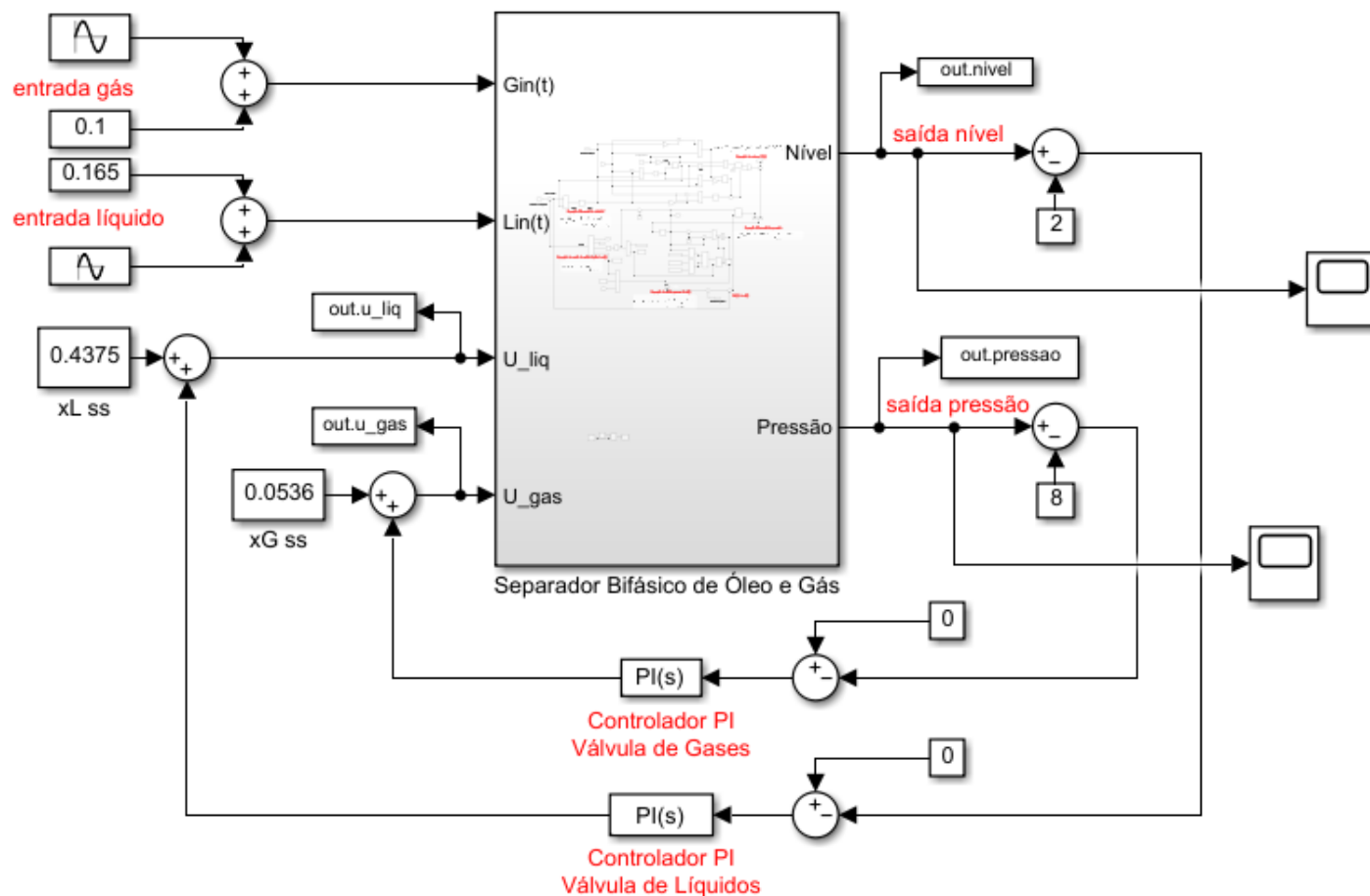


Fig. 17. Simulação do SB em Diagrama de Blocos no *Simulink*®.



APÊNDICE B

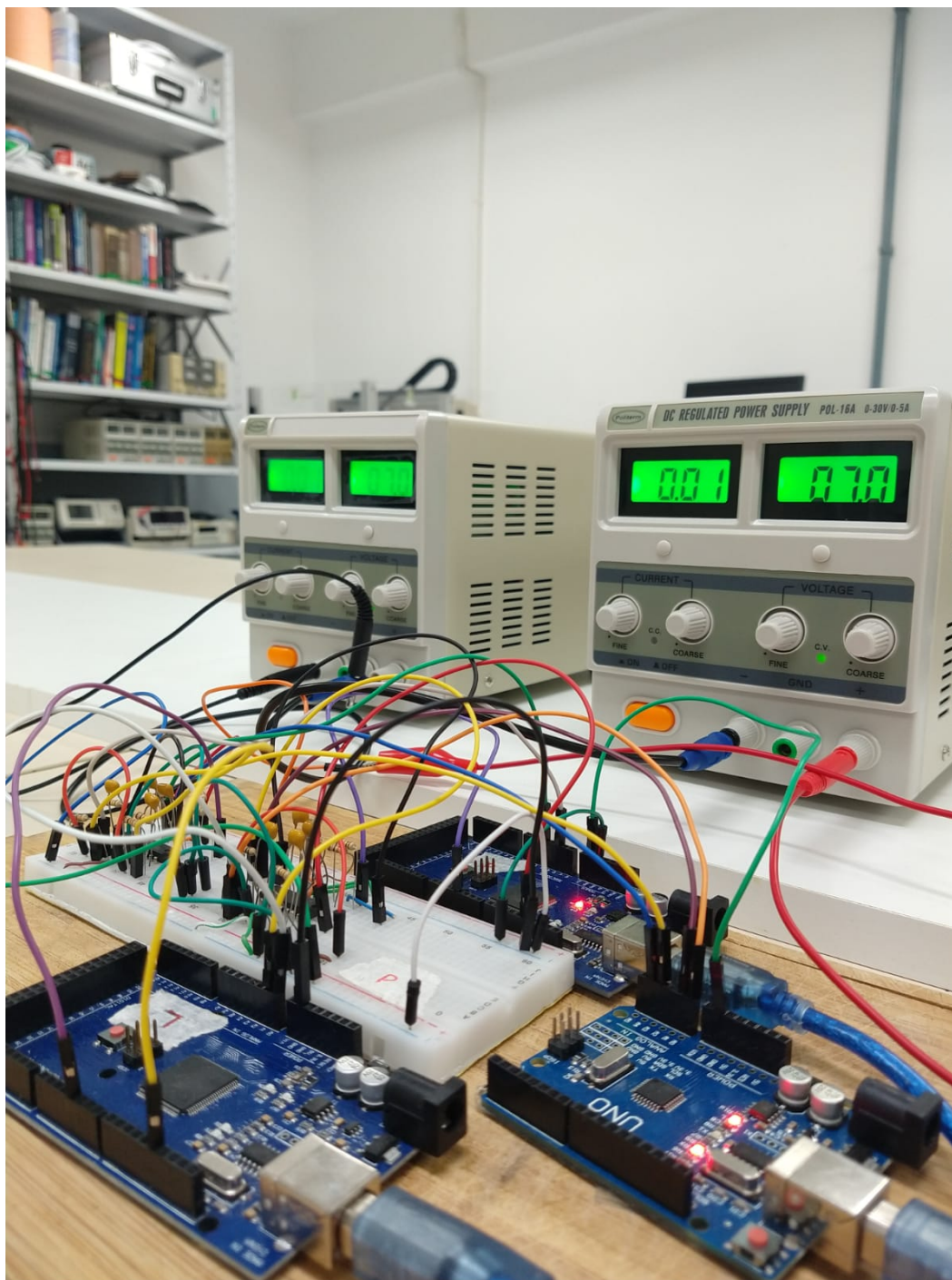


Fig. 18. Foto do sistema *HiL* do SB durante as capturas de dados no laboratório do IFSC.



APÊNDICE C

Planta Separador Bifásico

Yuri Matheus Scheuer

```
1  /* Autor: Yuri Matheus Scheuer
2     Ano: 2023
3     Este código é parte integrante do TCC e tem a seguinte funcionalidade:
4     Emular o funcionamento de um separador bifásico de óleo e gás, reproduzindo
5     suas variáveis de nível de óleo e pressão interna conforme o modelo matemático;
6     Servir como base para a implementação de sistemas de controle digital via HiL.
7  */
8  // Inclusão de bibliotecas
9  #include <math.h>
10 #include <TimerThree.h>
11
12 // Definição dos termos constantes
13 volatile double pi = 3.1415926;
14 volatile double t0 = 0; // Tempo inicial
15 volatile double tf = 100; // Tempo final
16 volatile double dt = 0.01; // Período de amostragem
17 volatile double ni = 1000000; // Numero total de iterações (1 milhão)
18 volatile double Vmax = 5.00; // Limite de tensão superior do Arduino
19
20 volatile double upwm = 0.0;
21 volatile double upwm2 = 0.0;
22 int PWM = 13; // saída pwm nível
23 int PWM2 = 4; // saída pwm pressão
24
25 // Declaração dos pinos analógicos
26 volatile double analogPinNivel = A5; // nível (m)
27 volatile double analogPinPressao = A1; // pressão (bar)
28 volatile double analogPinLiqValve = A2; // taxa de abertura da válvula de líquidos (de 0 a 1, onde 0 é totalmente fechada e 1 é totalmente aberta)
29 volatile double analogPinGasValve = A4; // taxa de abertura da válvula de gases (de 0 a 1, onde 0 é totalmente fechada e 1 é totalmente aberta)
30
31 // Declaração das constantes do separador bifásico
32 volatile double V = 56.55; // volume total do tanque (m³)
33 volatile double MMg = 0.021; // Massa Molar do gás
34 volatile double T = 303.15; // Temperatura no interior do tanque
35 volatile double R = 8.3144621e-5; // Constante universal dos gases
36 volatile double C = 8.00; // Comprimento do tanque (m)
37 volatile double D = 3.00; // Diâmetro do tanque (m)
38 volatile double ro_h2o = 999.20; // Densidade específica da água
39 volatile double ro_L = 850; // densidade específica do hidrocarboneto
40 volatile double xL = 0.4375; // abertura da válvula de líquidos em regime permanente
41 volatile double xG = 0.0536; // abertura da válvula de gases em regime permanente
42 volatile double Cv1 = 1025; // Coeficiente de vazão da válvula de óleo
43 volatile double Cvg = 120; // Coeficiente de vazão da válvula de gás
44 volatile double P1 = 6.00; // Pressão à jusante da válvula de óleo
45 volatile double P2 = 6.00; // Pressão à jusante da válvula de gás
46
47 // Condições iniciais da planta
48 volatile double dh_k = 0.00;
49 volatile double dh_km1 = 0.00;
50 volatile double h_k = 0.00;
51 volatile double h_km1 = 2.00;
52 volatile double dP_k = 0.00;
53 volatile double dP_km1 = 0.00;
54 volatile double P_k = 0.00;
55 volatile double P_km1 = 8.00;
56 volatile double ro_g_k = 0.00;
57 volatile double ro_g_km1 = (P_km1 * MMg) / (R * T);
58 volatile double V1_k = 0.00;
59 volatile double Lout_k = 0.00;
60 volatile double Gout_k = 0.00;
```



APÊNDICE C

```
61 volatile double Lout_km1 = (2.4e-4) * xL * Cv1 * sqrt((P_km1 - P1) / (ro_L / ro_h2o));
62 volatile double Gout_km1 = (2.4e-4) * xG * Cvg * sqrt((P_km1 - P2) * (P_km1 + P2) /
(ro_g_km1 / ro_h2o));
63
64 // tempo para as golfadas
65 volatile double t = 0.00;
66 volatile double Lin_ss = 0.165; //ss - steady state (valor de regime)
67 volatile double Gin_ss = 0.1;
68 volatile double Lin = Lin_ss;
69 volatile double Gin = Gin_ss;
70
71 void setup() {
72
73     Serial.begin(115200); // COMENTAR DURANTE OS TESTES
74     //Definições da interrupção por tempo:
75     Timer3.initialize(10000); // Inicializa Timer3 com período de amostragem (em us) (10
ms)
76     Timer3.attachInterrupt(planta); // Define a interrupção de tempo
77     TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000010; // Frequência do PWM de 7812.50 Hz
78
79     //Configurando o status dos pinos
80     pinMode(PWM, OUTPUT);
81     pinMode(PWM2, OUTPUT);
82     pinMode(analogPinNivel, OUTPUT);
83     pinMode(analogPinPressao, OUTPUT);
84     pinMode(analogPinLiqValve, INPUT);
85     pinMode(analogPinGasValve, INPUT);
86 }
87
88 void planta() {
89
90     //Implementação da planta via Runge Kutta de 4ªOrdem
91
92     //válvulas de saída
93     xL = analogRead(analogPinLiqValve) * 5.00 / 1023.00;
94     xG = analogRead(analogPinGasValve) * 5.00 / 1023.00;
95
96     //golfadas
97     t = t + dt;
98     Lin = Lin_ss + 0.082 * sin((2 * pi * t) / 2800);
99     Gin = Gin_ss + 0.075 * sin((2 * pi * t) / 2800);
100
101     //implementação da modelagem da planta
102     Lout_km1 = (2.4e-4) * xL * Cv1 * sqrt((P_km1 - P1) / (ro_L / ro_h2o));
103     Gout_km1 = (2.4e-4) * xG * Cvg * sqrt((P_km1 - P2) * (P_km1 + P2) / (ro_g_km1 /
ro_h2o));
104     ro_g_k = (P_km1 * MMg) / (R * T);
105     V1_k = ((C * D * D) / 4) * (acos((D - 2 * h_km1) / D) - (2 * (sqrt(D - h_km1) * h_km1) /
D) * ((D - 2 * h_km1) / D));
106     Lout_k = (2.4e-4) * xL * Cv1 * sqrt((P_km1 - P1) / (ro_L / ro_h2o));
107     Gout_k = (2.4e-4) * xG * Cvg * sqrt((P_km1 - P2) * (P_km1 + P2) / (ro_g_km1 / ro_h2o));
108     dP_k = (P_km1 * (Gin - Gout_km1 + Lin - Lout_km1)) / (V - V1_k);
109     P_k = dP_k * dt + P_km1;
110     dh_k = (Lin - Lout_km1) / (2 * C * sqrt((D - h_km1) * h_km1));
111     h_k = dh_k * dt + h_km1;
112
113     //atualizando as variáveis para a iteração
114     dh_km1 = dh_k;
115     h_km1 = h_k;
116     dP_km1 = dP_k;
117     P_km1 = P_k;
118     ro_g_km1 = ro_g_k;
119     Lout_km1 = Lout_k;
120     Gout_km1 = Gout_k;
121
122     // adequações dos sinais para serem 'escritos'/enviados nas saídas PWM
123     upwm = (h_k / Vmax) * 255;
124     upwm2 = (P_k / (4.00 * Vmax)) * 255; // necessário div.por 4, pois em ss a pressão chega
a 8 bar
```



APÊNDICE C

```
125
126 // Impedimento de dar um valor negativo para os sinais PWM
127 if (upwm < 0) {
128     upwm = 0;
129 }
130 if (upwm2 < 0) {
131     upwm2 = 0;
132 }
133 //enviando os sinais de pressão e nível através de duas saídas PWM
134 analogWrite(PWM, upwm); //nível do tanque (pino 13)
135 analogWrite(PWM2, upwm2); //pressão no tanque (pino 4)
136 }
137
138 void loop() {
139     //Prints apenas para verificação, comentar durante os testes
140     Serial.println("nível");
141     Serial.println(h_k, 3);
142     Serial.println("pressão");
143     Serial.println(P_k, 3);
144 }
```