

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO LINEAR
DE UMA PLANTA PILOTO
COM TANQUES INTERATIVOS

Yuri Barcellos Galli

Brasília, julho de 2017



ENGENHARIA
MECATRÔNICA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO
MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO LINEAR
DE UMA PLANTA PILOTO
COM TANQUES INTERATIVOS

Yuri Barcellos Galli

*Relatório submetido como requisito parcial de obtenção
de grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Henrique Cezar Ferreira , ENE/UnB

Orientador

Prof. Eduardo Stockler Tognetti, ENE/UnB

Co-orientador

Prof. Adolfo Bauchspiess, ENE/UnB

Examinador

Brasília, julho de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

GALLI, YURI BARCELLOS

Modelagem e identificação linear de uma planta piloto com tanques interativos,

[Distrito Federal] 2017.

xii, 54p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2017). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Modelagem

2. Identificação

3. Validação

4. Caixa-cinza

I. Mecatrônica/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GALLI, YURI BARCELLOS, (2017) Modelagem e identificação linear de uma planta piloto com tanques interativos. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT. TG-*n*°012, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 54p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Yuri Barcellos Galli

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Modelagem e identificação linear de uma planta piloto com tanques interativos.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Yuri Barcellos Galli

Faculdade de Tecnologia - FT

Campus Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília (UnB)

CEP 70919-970 Brasília – DF – Brasil.

Agradecimentos

Agradeço, antes de tudo, aos meus pais. Não seria possível que eu estivesse dentro da Universidade de Brasília sem o esforço realizado por eles para a concretização disso. Só eles, ou talvez nem mesmo eles, sabem o quanto sou grato por todas as oportunidades que eles me proporcionaram de crescer. Da mesma forma, agradeço à Nice, que é verdadeiramente a minha segunda mãe; não há palavras para agradecer a relevância da passagem dela em minha vida.

Em seguida, faço uma menção ao meu irmão, cuja companhia é uma dádiva sem a qual a minha vida não seria a mesma. Entre nós as palavras não falam tanto quanto os gestos, e, mesmo que eu não o diga isso cotidianamente, ele é uma parte essencial de mim mesmo.

Digo obrigado também à minha família em geral, cuja convivência me moldou na pessoa que sou hoje. Meus avós e avós, tios e tias, primos e primas; tanto os vivos na Terra, quanto aqueles que vivem agora apenas na nossa memória. São tantas pessoas especiais, que se eu esquecesse de mencionar uma sequer ao tentar listá-las, eu não me perdoaria. Porém, o meu coração está junto ao de todas elas.

Sem os colegas de curso, a caminhada que me trouxe até aqui seria apenas uma aventura acadêmica. Então, a eles agradeço por darem vida a todos os conteúdos, aulas e estudos que compartilhamos durante todo o período enquanto estudantes de engenharia. O mesmo digo sobre os amigos de fora da universidade, eles aliviam o pesado fardo que é o ritmo de estudar em um lugar como a UnB.

Da mesma forma, sou grato aos mestres que tive, tanto no ambiente universitário quanto nos outros aspectos de minha vida. Pequenos focos de luz que, mesmo supervisionando às vezes quarenta alunos ao mesmo tempo, foram capazes de influenciar a formação de cada um individualmente. Parablenizo aqueles que se comprometem realmente com o crescimento dos alunos e discípulos, aqueles que fazem dessa evolução o combustível de sua profissão e vocação.

Por último guardei o meu profundo agradecimento à Filosofia da Nova Acrópole e a cada um de seus membros, por me ensinarem a dar a cada uma de minhas ações e pensamentos um significado real e que busca a eternidade. Se enxergamos que tudo é fonte de aprendizado, todos os nossos esforços serão frutíferos; se identificamos em cada pessoa uma chance de aprender, todas as nossas relações serão direcionadas para o bem, e juntos caminharemos para construir um mundo novo e melhor. Este trabalho de graduação é um tijolo que ofereço para a morada que estamos erguendo.

Yuri Barcellos Galli

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para modelar, identificar e validar um processo composto por dois tanques interativos. Primeiramente, um conjunto de equações não lineares foi obtido a partir do balanço de massa e de energia do sistema. Tais equações foram utilizadas para simular o sistema, prevendo seu possível comportamento (nível e temperatura dos tanques) a diferentes tipos e intensidades de estímulos (vazão de entrada de líquido nos tanques e resistências para aquecimento do líquido). Para identificar os parâmetros do modelo de balanço de massa, foi utilizada uma abordagem caixa-cinza. Variando-se a frequência dos inversores (e, conseqüentemente, a vazão de entrada dos tanques), mediu-se o nível dos dois tanques ao longo do tempo. O modelo não linear foi linearizado em torno de um ponto de equilíbrio e tanto os parâmetros do modelo não linear como do modelo linearizado foram estimados com o auxílio de funções do Matlab, de modo a minimizar o erro entre os dados de medição e os dados calculados pelo modelo. Os modelos obtidos foram validados calculando-se o erro médio normalizado e o erro quadrático médio a partir de dados diferentes dos utilizados na etapa de identificação.

ABSTRACT

This work presents a methodology to model, identify and validate a process consisting of two interative tanks. Firstly, a set of equations was obtained theoretically from the mass and energy balance of the system. Such equations were used to simulate the system, predicting its possible behavior (level and temperature of the tanks) towards different types and intensities of stimuli (liquid input flow to the tanks and liquid heating using thermal resistances). To identify the parameters of the mass balance model, a grey box approach was used. Changing the frequency of the inverters (and, consequently, the input flow to the tanks), the liquid level was measured in the tanks in time. The non linear model was linearized about a balance point and both the non linear model parameters and the linear model ones were estimated with the aid of Matlab functions, in order to minimize the error between the measured data and the data calculated by the model. The models obtained were validated by calculating the normalized root mean square error, and also mean square error, from data different from that used in the identification.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS DO PROJETO	2
1.2	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	3
2	FUNDAMENTAÇÃO E MODELAGEM	4
2.1	INTRODUÇÃO	4
2.2	CONFIGURAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA PLANTA PILOTO	4
2.3	INFORMAÇÕES DE INTERESSE DA PLANTA	7
2.4	DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	8
2.5	MODELO MATEMÁTICO.....	9
2.5.1	BALANÇO DE MASSA.....	10
2.5.2	BALANÇO DE ENERGIA	10
2.6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS EQUAÇÕES NÃO LINEARES.....	12
3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS - IDENTIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	17
3.1	PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE BALANÇO DE MASSA	18
3.1.1	RELAÇÃO ENTRE VAZÃO (Q) E FREQUÊNCIA (F).....	19
3.2	LINEARIZAÇÃO	19
3.3	IDENTIFICAÇÃO	21
3.4	COMPARAÇÃO DOS MODELOS IDENTIFICADOS	33
3.5	MODELO CAIXA-CINZA NÃO LINEAR UTILIZANDO <code>nlgreyest()</code>	39
4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
	ANEXOS	47
I	IDENTIFICAÇÃO LINEAR NO MATLAB	
	UTILIZANDO A FUNÇÃO <code>greyest()</code>	48
II	IDENTIFICAÇÃO NÃO LINEAR NO MATLAB	
	UTILIZANDO A FUNÇÃO <code>nlgreyest()</code>	52

LISTA DE FIGURAS

2.1	Instalação física da planta piloto.....	5
2.2	Planta com variáveis de interesse	6
2.3	Diferença de nível no líquido dos tanques	9
2.4	Diagrama de blocos que descrevem as equações do sistema no Simulink.....	12
2.5	Diagrama das equações geradas pelo balanço de massa no Simulink	13
2.6	Resposta dos níveis de líquido h_1 e h_2 ao degrau unitário na vazão f_1	13
2.7	Resposta dos níveis de líquido h_1 e h_2 ao degrau unitário na vazão f_2	14
2.9	Resposta das temperaturas simuladas T_1 e T_2 ao degrau na potência p_1	14
2.8	Diagrama simplificado das equações geradas pelo balanço de energia.....	16
3.1	Resultado do Ensaio 1	22
3.2	Resultado do Ensaio 2 com apenas B1 ligada, degraus de 2 em 2%.....	23
3.3	Resultado do Ensaio 2 com apenas B2 ligada, degraus unitários de porcentagem	24
3.4	Gráfico de identificação de faixa de operação no Ensaio 2	25
3.5	Relação entre frequência e ganhos k_3 com relação ao nível de líquido.....	25
3.6	Dados do Ensaio 3	26
3.7	Validação do Ensaio 3	27
3.8	Resultado do Ensaio 3.....	27
3.9	Dados do Ensaio 4.....	29
3.10	Resultado do Ensaio 4.....	30
3.11	Entrada para validação do Ensaio 4	30
3.12	Dados do Ensaio 5.....	31
3.13	Resultado do Ensaio 5.....	32
3.14	Entrada para validação do Ensaio 5	32
3.15	Modelos comparados com os dados de validação do Ensaio 3	34
3.16	Modelos comparados com os dados de validação do Ensaio 4	34
3.17	Modelos comparados com os dados de validação do Ensaio 5	34
3.18	Diagrama de blocos do Modelo 1, caixa-cinza linear, no Simulink	35
3.19	Diagrama das equações lineares originadas do balanço de massa, no Simulink	36
3.20	Resposta do nível h_1 ao degrau na frequência f_1 , no Simulink	36
3.21	Resposta do nível h_2 ao degrau na frequência f_2 , no Simulink	36
3.22	Modelo no Simulink utilizado na coleta de dados da planta piloto.....	38
3.23	Resultado da identificação utilizando a função <code>nlgreyest()</code> no Matlab.....	39

LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela de unidades das variáveis do processo	8
3.1	Configurações dos ensaios, relação com as bombas B1 e B2 , e modelo gerado	33
3.2	Resultados de todos os modelos com todos os ensaios	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos - Variáveis e Constantes

A	Área da seção transversal do tanque	[m ²]
c	Calor específico	-
c_p	Calor específico a pressão constante	[kJ/kg·K]
c_v	Calor específico a volume constante	[kJ/kg·K]
E	Energia	[J]
f	Frequência de inversão	[Hz] ou [%]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Nível de líquido	[m] ou [%]
k_1	Constante de proporcionalidade de f_1 para h_1	-
k_2	Constante de proporcionalidade de f_2 para h_2	-
k_3	Constante da vazão intermediária q_{12}	-
k_4	Constante da vazão de saída q_o	-
p	Potência fornecida pela unidade de aquecimento	[W] ou [%]
q	Vazão de líquido	[m ³ /s] ou [%]
T	Temperatura	[°C] ou [%]
T_a	Temperatura do líquido na unidade de aquecimento	[°C] ou [%]
T_r	Temperatura do líquido no tanque de armazenamento	[°C] ou [%]
V	Volume	[m ³]
V_a	Volume de líquido na unidade de aquecimento	[m ³]

Símbolos Latinos - Componentes

B	Bomba hidráulica
I	Inversor de frequência
Pot	Componente de aquecimento resistivo
R	Tanque
Ra	Unidade de aquecimento
Re	Reservatório
Va	Válvula

Símbolos Gregos

α	Parâmetro de identificação	$\left[\frac{k_2}{2\sqrt{(h_{1e}-h_{2e})}} \right]$
β	Parâmetro de identificação	$\left[\frac{k_3}{2\sqrt{(h_{2e})}} \right]$
γ	Peso específico	$[\text{N}/\text{m}^3]$
Δ	Varição entre duas grandezas similares	-
ρ	Densidade	$[\text{m}^3/\text{kg}]$

Subscritos¹

1	Relativo ao Tanque 1
2	Relativo ao Tanque 2
12	Do Tanque 1 para o Tanque 2
<i>aq</i>	Relativo à Unidade de Aquecimento
<i>amb</i>	Relativo ao ambiente
<i>e</i>	Relativo a estado estacionário
<i>ext</i>	Relativo ao que é externo
<i>i</i>	Relativo à entrada (<i>in</i>)
<i>o</i>	Relativo à saída (<i>out</i>)
<i>ref</i>	Relativo à referência
<i>tan</i>	Relativo a um tanque
<i>tub</i>	Relativo a uma tubulação

Sobrescritos

\dot{x}	Derivada temporal
\tilde{x}	Variável incremental

Siglas

CLP	Controlador Lógico Programável
PRBS	<i>PseudoRandom Binary Signal</i>
FPE	Akaike's Final Prediction Error para o modelo estimado
greyest	Função do Matlab que estima um modelo caixa-cinza linear
MSE	<i>Mean square error</i>
nlgreyest	Função do Matlab que estima um modelo caixa-cinza não linear
NRMSE	<i>Normalized root mean square error</i>

¹Subscritos mais específicos descritos nas seções correspondentes.

Capítulo 1

Introdução

Controle de processos é um conjunto de técnicas que permite manter variáveis ou características de um sistema em pontos de operação desejados [1]. A teoria que envolve essas técnicas pode ser aplicada aos mais diversos campos da ciência e da tecnologia como em sistemas de controle de poluição [2], em indústrias alimentícias [3], etc. Para aplicar essas técnicas, primeiramente cria-se um modelo do processo que se deseja controlar [4], para então fazer testes em suas instalações físicas. As simulações desempenham um importante papel nesse processo, pois permitem que técnicas de projeto sejam testadas antes de serem implementadas na prática. No entanto, é fundamental que haja um sistema físico no qual validar o projeto desenvolvido [5].

Em aplicações de larga escala, não é possível fazer testes empíricos *a priori*, pois seu custo pode ser proibitivo. Justifica-se então o uso de plantas industriais em escala reduzida para testar o comportamento do sistema. São as chamadas plantas-piloto, que contam com estrutura no mesmo modelo das plantas industriais, apenas em proporção reduzida. O grande desafio dessa metodologia é encontrar meios de garantir que os testes realizados em uma planta piloto continuem válidos [6] em sua versão industrial de grande escala, e que os custos para desenvolvimento sejam reduzidos nesse processo.

Antes de automatizar ou mesmo controlar uma planta piloto, é necessário conhecer bem o seu funcionamento e seus comportamentos transitório e permanente. Torna-se fundamental modelar o problema segundo as leis fenomenológicas, por exemplo a conservação de massa e energia [7], [8]. A análise objetiva do processo permite avaliar quais variáveis ou parâmetros cujo conhecimento é indispensável, e segundo alguns métodos da literatura [9] é possível criar modelos mais ou menos detalhados, dependendo dos requisitos escolhidos, para pormenorizar o comportamento da planta. Após a realização da identificação dos parâmetros do modelo da planta, é necessário validar o modelo obtido, de modo a garantir que o modelo representa bem o processo em estudo.

Há diversos métodos para identificar e validar um modelo, e as características de cada método podem variar de acordo com a quantidade de informação que se tem acerca do

problema em questão [10]. Quando a fenomenologia do processo é conhecida, o modelo para identificá-lo é dito caixa-branca. Aquilo que se quer conhecer são os parâmetros das equações, que condizem com características estruturais da planta, como: área da seção transversal de um tanque, gravidade no local, densidade do líquido, etc. Quando essa fenomenologia não é conhecida, o modelo é dito caixa-preta. Dependendo da qualidade do modelo, obtém-se uma aproximação melhor ou pior dos parâmetros de suas equações, parâmetros esses que são genéricos, não correspondendo diretamente com variáveis da planta. No meio-termo, está a modelagem caixa-cinza, abordada neste trabalho. Trata-se de quando se tem uma estrutura mais ou menos conhecida do equacionamento do processo, ou seja, quando se sabe a ordem, os termos, onde haverá constantes e onde haverá parâmetros para se identificar [11]. No modelo caixa-cinza, tem-se tipicamente as equações para o sistema em uma versão simplificada, que desconsidera certos comportamentos presentes em um modelo caixa-branca. Então, computacionalmente, os parâmetros presentes no modelo simplificado são calculados para melhor se ajustar aos dados obtidos em experimentos. Tipicamente, na literatura, divide-se o conjunto de dados do experimento em 70% dos dados para identificação e 30% para validação [10]. Essa escolha foi respeitada neste trabalho.

Uma vez consolidado o modelo que descreve o comportamento do sistema real, passa-se para o controle e a automação desse sistema, objetivo último de todo esse conjunto de técnicas descritas. No entanto, para o escopo deste trabalho, apenas a modelagem, a identificação e a validação de modelos serão realizadas na planta piloto real, localizada no Laboratório de Controle de Processos Industriais da UnB.

1.1 Objetivos do projeto

Os objetivos do projeto são, a partir da análise fenomenológica do balanço de massa e de energia de uma planta piloto real, modelar por meio de equações o comportamento das suas variáveis de estado: nível e temperatura. A partir das equações não lineares obtidas, realizar uma linearização em torno de um ponto de operação e identificar os parâmetros do modelo segundo métodos caixa-cinza linear e não linear, utilizando as funções `greyest()` e `nlgreyest()` do *software* Matlab. Essa identificação foi aplicada apenas no do balanço de massa, que envolve os níveis de líquido como resposta; a configuração da planta piloto utilizada na identificação foi com as duas bombas ligadas, e um dos tanques sem vazão de saída direta para o reservatório. Ao final, a meta era validar os modelos utilizando ainda o Matlab e seus critérios de comparação para analisar a qualidade dos ajustes obtidos aos dados. Como objetivo secundário, esperava-se obter modelos em outras configurações da planta piloto, para verificar se os modelos eram coerentes entre si por alguma validação cruzada.

1.2 Apresentação do manuscrito

Este relatório está estruturado em quatro capítulos, sendo este, o Capítulo 1, referente à introdução e à definição dos objetivos do projeto.

No Capítulo 2, são apresentadas a fundamentação e a modelagem do sistema em questão. São descritas a planta piloto e as suas principais características, tanto físicas quanto fenomenológicas.

Ao longo do Capítulo 3, os resultados experimentais dos ensaios são exibidos e analisados. Os experimentos tiveram como finalidade a identificação e a validação de um modelo para descrever o funcionamento da planta piloto; modelo este que tem seu formato derivado e simplificado das equações do Capítulo 2.

No Capítulo 4, há uma síntese com as conclusões feitas acerca dos resultados obtidos. A partir dessa síntese, são propostos aspectos a se trabalhar e desenvolver em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação e Modelagem

2.1 Introdução

As características da planta piloto mencionada na Seção 1.1 são o ponto chave de todo este trabalho. Cada um dos capítulos e seções nele dispostos busca aproximar os conceitos teóricos conhecidos do funcionamento real da planta, para possibilitar a identificação e a validação de um modelo.

A problemática deste trabalho gira em torno de uma instalação de dois tanques interativos a nível de balanço de massa e de energia. O estudo desse sistema permite gerar conhecimentos aplicáveis a operações industriais em grande escala, pelo uso de materiais industriais e componentes comuns nesse meio. Neste capítulo serão apresentados os embasamentos físicos e matemáticos utilizados para criar as equações que descrevem o comportamento da planta piloto em suas particularidades.

2.2 Configuração e Características da Planta Piloto

A instalação física em que todos os dados experimentais foram colhidos é mostrada na Figura 2.1.

A planta piloto é composta por alguns componentes que são evidenciados na Figura 2.2. São eles:

- 2 tanques cilíndricos interativos em aço inoxidável: **R1**, com aquecimento resistivo interno **Pot1**, e **R2** sem aquecimento. Os tanques apresentam revestimento interno em Aquatherm, que atenua perdas para o ambiente;
- 1 tanque cilíndrico em aço com pintura eletrostática para armazenamento de água: **Re**, também referido como reservatório;
- 1 unidade de aquecimento cilíndrica em aço: **Ra**, com aquecimento resistivo **Pot2**;



Figura 2.1: Instalação física da planta piloto

- 2 bombas centrífugas: **B1** e **B2**. As bombas são do mesmo modelo trifásico: MARK NXDP2, potência 0,37 kW (0,5 cv), rotor com 120 mm de diâmetro, conexões DNS e DNR 1", com rotação corrigida de 3500 rpm. O rendimento do motor WEG interno é de 76%, o da bomba é de 50,7% e o do conjunto é 35,5%. A vazão nominal é de aproximadamente 8,2 m³/h, com altura manométrica 16 mca;
- As 2 bombas são controladas por 2 inversores de frequência: **I1** e **I2**. Os inversores são de controle vetorial "sensorless", da marca Dakol, série CHE, e recebem tensão 380/220 V ±15%, com frequência máxima de saída de 600 Hz;
- Válvulas do tipo esfera para controlar a passagem de líquido na tubulação, com configuração: **Va1** completamente fechada, **Va2** e **Va3** completamente abertas;
- Tubulações em PVC 3/4" pintado, resistentes a temperatura;
- Chaves de nível nos dois tanques, que impedem que ocorra vazamento ao desligar as bombas quando o máximo volume é atingido;
- 1 CLP que gerencia todo o processo e se comunica com um computador;
- 1 computador que centraliza as informações recebidas e controla a planta.

Para entender o sistema real, cria-se um diagrama que envolve os elementos de interesse da instalação física. Esse diagrama, mostrado na Figura 2.2, simplifica e torna mais claro o problema a ser analisado.

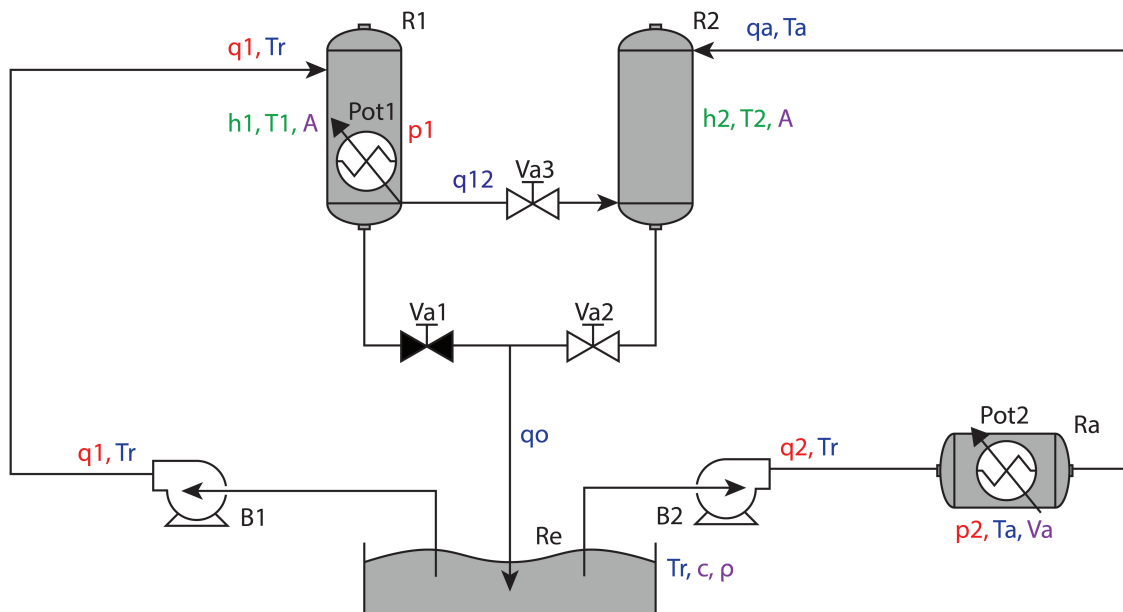


Figura 2.2: Planta com variáveis de interesse

2.3 Informações de Interesse da Planta

Ao observar a Figura 2.2, há algumas grandezas e variáveis chave para o entendimento do funcionamento da planta piloto, são elas:

- Variáveis manipuladas (coloração **vermelha** na Figura 2.2):
 - Vazões fornecidas pelas bombas **B1** e **B2**: q_1 e q_2 ;
 - Potências dos aquecimentos resistivos **Pot1** e **Pot2**: p_1 e p_2 .
- Variáveis medidas (coloração **verde** na Figura 2.2):
 - Altura/nível do líquido nos tanques **R1** e **R2**: h_1 e h_2 ;
 - Temperatura do líquido nos tanques **R1** e **R2**: T_1 e T_2 .

As variáveis manipuladas são aquelas que são alteradas diretamente por ação humana no programa que gerencia o processo ou por ação de um controlador automático. As variáveis medidas têm seu valor alterado indiretamente, por meio da ação das variáveis manipuladas. Há ainda outras variáveis medidas na planta piloto que não estão presentes nessa lista. São elas: acionamento dos inversores de frequência (variável binária, que indica se os inversores estão ligados ou desligados), vazão na linha (que indica se a vazão de líquido entre a bomba **B2** e o tanque **R2**). As tomadas de temperatura na planta são feitas na entrada e na saída do tanque **R1** e na saída do tanque **R2**. Considerou-se que a temperatura da água que entra no tanque **R1** é a mesma do tanque de armazenamento, T_r , e temperatura da água que entra no tanque **R2** é a mesma que sai da unidade de aquecimento. Além disso, a temperatura medida na saída dos tanques foi considerada como sendo iguais as temperaturas no interior dos tanques.

- Variáveis auxiliares do sistema (coloração **azul** na Figura 2.2):
 - Temperatura do líquido no tanque de armazenamento **Re**: T_r ;
 - Vazão de líquido entre os tanques **R1** e **R2**: q_{12} ;
 - Vazão de saída de líquido do tanque **R2**: q_o ;
 - Vazão de saída de líquido da unidade **Ra**: q_a , que é igual à vazão q_2 ;
 - Temperatura do líquido na unidade **Ra**: T_a .
- Constantes (coloração **lilás** na Figura 2.2):
 - Área da seção transversal dos tanques cilíndricos **R1** e **R2**: $A = 183 \text{ cm}^2$;
 - Volume de líquido na unidade **Ra**: V_a , constante em aproximadamente 2 l;
 - Calor específico do líquido do processo, água: $c = 4,186 \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$;

– Densidade do líquido do processo, água: $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$.

As unidades de cada variável apresentada podem ser vistas na Lista de Símbolos. Quanto às grandezas de nível ou altura de líquido, temperatura, frequência e potência de aquecimento, considerou-se que são medidas em porcentagem. Essa escolha é proveniente da própria característica da instalação da planta piloto, cuja interação do CLP com os sensores se baseia em uma escala de 0 a 100% para lidar com as variáveis. Para cada uma dessas variáveis de interesse, os valores mínimo e máximo, em suas unidades reais, são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Tabela de unidades das variáveis do processo

Variável	Unidade	Valor máximo	Valor mínimo
Nível (h)	Metro [m]	0	1
Temperatura (T)	Celsius [°C]	0	100
Frequência (f)	Hertz [Hz]	0	60
Potência (p)	Watt [W]	0	3000

A frequência em 100% ativa a bomba até que ela forneça uma vazão máxima de $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

2.4 Descrição do Processo

A finalidade do processo é controlar o nível h_2 e a temperatura T_2 , ambos do tanque **R2**. O líquido no interior dos tanques é considerado bem misturado, de forma que a temperatura do líquido em seus interiores é a mesma em todos os pontos. O líquido considerado em todo o processo é água, cujo calor específico é c e densidade é ρ . Considera-se, para efeitos de simplificação, que o processo não perde calor para o ambiente externo em suas tubulações, tanques, etc.

O tanque **R1** serve como atenuador da turbulência [12] da recepção de líquido pela vazão de entrada. **R1** recebe líquido a uma vazão q_1 e a uma temperatura T_r . A vazão q_1 é proveniente da ação da bomba **B1**, e a temperatura T_r é a do reservatório **Re**. A água é aquecida nesse tanque por meio do aquecimento resistivo **Pot1**, cuja potência de aquecimento é p_1 . A temperatura T_1 em seu interior é fornecida em sua saída, a comunicação é dada pela tubulação com a válvula **Va3**.

Como a válvula **Va1** está sempre fechada na configuração escolhida, o único caminho de saída para o líquido no tanque **R1** é pela linha em que está a válvula **Va3**, e a vazão dessa saída é q_{12} . De acordo com a literatura [6], q_{12} é uma função da raiz quadrada entre a diferença de nível ($h_1 - h_2$). Quando $h_1 > h_2$, como mostra a Figura 2.3, o líquido flui de **R1** para **R2**. Quando $h_2 > h_1$, o contrário ocorre, o líquido flui de **R2** para **R1**. Quando $h_1 = h_2$, a vazão q_{12} é nula, ou seja, não há troca de líquido entre os tanques. Para as considerações deste trabalho, opera-se a planta sempre com $h_1 > h_2$, ou seja, o líquido

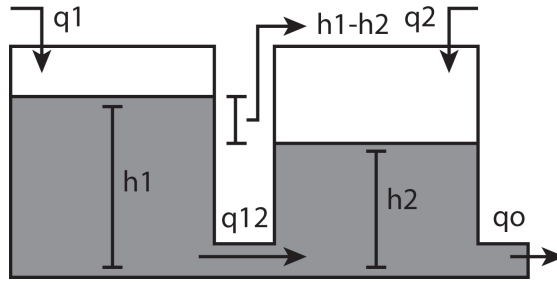


Figura 2.3: Diferença de nível no líquido dos tanques

sempre flui do tanque **R1** para o tanque **R2**. O comportamento da vazão entre os tanques é modelado por:

$$q_{12} = k'_3 \text{sign}(h_1 - h_2) \sqrt{|h_1 - h_2|}, \quad (2.1)$$

em que k'_3 é uma constante a ser determinada. O sinal dessa equação, que determina o sentido da vazão, é dado pela função $\text{sign}(h_1 - h_2)$, que resulta em 1 se $h_1 - h_2 > 0$ e em -1 se $h_1 - h_2 < 0$.

Para a vazão de saída q_o , tem-se que:

$$q_o = k'_4 \sqrt{h_2}, \quad (2.2)$$

em que k'_4 é uma constante a ser determinada.

A unidade de aquecimento **Ra** recebe líquido do reservatório **Re**, a uma vazão q_2 e a uma temperatura T_r . Diferentemente de como ocorre no tanque **R1**, a unidade **Ra** aquece a linha de transmissão de líquido, e não o conteúdo de um dos tanques de interesse. No entanto, **Ra** é também um tanque cilíndrico, só que com proporções menores. Sendo assim, seu modelamento é feito de maneira análoga ao dos tanques **R1** e **R2**, porém com simplificações. O volume dentro dela, chamado de V_a , não varia. A água que chega na unidade **Ra** é aquecida por meio do aquecimento resistivo **Pot2**, cuja potência de aquecimento é p_2 . Idealmente, a única alteração que é provocada por esse processo é o de aumento da temperatura no líquido, de modo que se espera uma manutenção da vazão na linha. Por isso, considera-se que a vazão q_2 que entra em **Ra** é a mesma em sua saída, q_a . Assim, $q_a = q_2$. A temperatura após o aquecimento na unidade é T_a .

O nível e a temperatura do Tanque **R2** são as variáveis que se deseja controlar de fato. O tanque **R2** recebe líquido pela vazão intermediária q_{12} , à temperatura T_1 fornecida pelo tanque **R1**. Além disso, também recebe líquido da unidade de aquecimento **Ra**, a uma vazão q_a e a uma temperatura T_a . O líquido no tanque **R2** escorre na saída a uma vazão q_o , sob a própria temperatura T_2 .

2.5 Modelo Matemático

O modelo matemático do processo considera basicamente dois aspectos: que o sistema troca massa, isto é, água entre um tanque e outro por meio das tubulações e outros compo-

mentes, e que também troca calor ou energia, processo que é veiculado nessa própria massa. O princípio que rege as equações obtidas é que nem a massa nem o calor são perdidos durante o processo [13], de forma que ao analisar dois instantes distintos é possível saber como essas grandezas se comportaram e se conservaram. Para tanto, faz-se, de maneira geral, em muitas aplicações [6], [4], o balanço de massa para descrever a troca de líquido no processo e o balanço de energia para descrever o seu comportamento térmico. Deduções mais aprofundadas das equações podem ser encontradas tanto nos artigos referenciados como em livros consagrados sobre transporte de calor e massa [14], [15].

2.5.1 Balanço de Massa

O balanço de massa descreve a movimentação de líquido no processo [16]. Basicamente, para um tanque cilíndrico, a variação de volume $V(t) = Ah(t)$ é a diferença entre a vazão de entrada $q_i(t)$ e de saída $q_o(t)$. Esse comportamento pode ser equacionado da seguinte maneira:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{d(Ah(t))}{dt} = A \frac{dh(t)}{dt} = q_i(t) - q_o(t), \quad (2.3)$$

pois a área A da seção transversal do cilindro é constante e apenas o nível h do líquido no interior do tanque varia com o tempo.

Assim, para o Tanque 1 da Figura 2.2, considerando $h_1(t) > h_2(t)$ tem-se

$$\begin{aligned} A \frac{dh_1(t)}{dt} &= q_1(t) - q_{12}(t), \\ A \frac{dh_1(t)}{dt} &= q_1(t) - k'_3 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

e para o Tanque 2 tem-se

$$\begin{aligned} A \frac{dh_2(t)}{dt} &= q_2(t) + q_{12}(t) - q_o(t), \\ A \frac{dh_2(t)}{dt} &= q_2(t) + k'_3 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} - k'_4 \sqrt{h_2(t)}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.5.2 Balanço de Energia

Os tanques de aço possuem um componente interno que mantém a água sempre misturada com o objetivo de uniformizar a temperatura do líquido em seu interior. Para simplificar as análises deste trabalho, considerou-se que a temperatura na água é homogênea em qualquer ponto do interior do tanque, e assim, que a temperatura de saída de líquido é a mesma do interior do recipiente. Sendo assim, para um tanque cilíndrico, o balanço de energia, que descreve as trocas de calor que ocorrem no processo, veiculadas pela água, pode ser equacionado da seguinte maneira, considerando as referências bibliográficas [1] e [17]:

$$A \frac{d[h(t)T(t)]}{dt} = q_i(t)T_i(t) - q_o(t)T_o(t) + \frac{p(t)}{c\rho}. \quad (2.6)$$

Há, nessa equação geral, uma derivada de multiplicação. O procedimento a ser realizado é a aplicação da regra da cadeia para multiplicação, no seguinte formato:

$$A \frac{d[h(t)T(t)]}{dt} = Ah(t) \frac{dT(t)}{dt} + AT(t) \frac{dh(t)}{dt}. \quad (2.7)$$

Considerando a Equação 2.3, o termo $dh(t)/dt$ pode ser substituído por $(q_i(t) - q_o(t)) / A$. Reescrevendo a Equação 2.7:

$$A \frac{d[h(t)T(t)]}{dt} = Ah(t) \frac{dT(t)}{dt} + AT(t) \frac{q_i(t) - q_o(t)}{A}. \quad (2.8)$$

Substituindo a Equação 2.8 na Equação 2.6:

$$Ah(t) \frac{dT(t)}{dt} + T(t) (q_i(t) - q_o(t)) = q_i(t)T_i(t) - q_o(t)T_o(t) + \frac{p(t)}{c\rho}. \quad (2.9)$$

Porém, $T_o(t) = T(t)$ pelo fato de o líquido no interior do tanque ser bem misturado. Ou seja, a temperatura do líquido na saída é igual à sua temperatura no interior do tanque. Se isso é levado em conta, ao substituir $T_o(t)$ por $T(t)$, a Equação 2.9 pode ser rearranjada e reescrita como:

$$Ah(t) \frac{dT(t)}{dt} = q_i(t)(T_i(t) - T(t)) + \frac{p(t)}{c\rho}. \quad (2.10)$$

A conclusão que se tira da expressão final da Equação 2.10, é que a contribuição da vazão de saída para o balanço de energia é nula, pois apenas aparece na expressão a vazão de entrada $q_i(t)$. No entanto, como pode ser estudado em algumas bibliografias [6], as vazões intermediárias, ou seja, entre tanques interativos, contribuem também para o balanço de calor. O sinal desse termo adicional é convencionalmente positivo em um tanque que recebe líquido. Além disso, o último termo da Equação 2.10 representa a energia fornecida pela resistência térmica.

A Equação 2.9 aplicada nos Tanques 1 e 2 e na unidade de aquecimento, exibidos na Figura 2.2, fornece, respectivamente, as Equações 2.11, 2.12 e 2.13 a seguir:

$$\begin{aligned} \frac{dT_1(t)}{dt} A h_1(t) &= q_1(t)(T_r - T_1(t)) \\ &\quad - k'_3 (T_1(t) - T_2(t)) \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} + \frac{p_1(t)}{c\rho}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\frac{dT_2(t)}{dt} A h_2(t) = q_a(t)(T_a(t) - T_2(t)) + k'_3 (T_1(t) - T_2(t)) \sqrt{h_1(t) - h_2(t)}, \quad (2.12)$$

$$\frac{dT_a(t)}{dt} V_a = q_2(t)(T_r - T_a(t)) + \frac{p_2(t)}{c\rho}. \quad (2.13)$$

As equações geradas pelo balanço de massa e pelo balanço de energia são o ponto principal deste trabalho. A partir de seu formato geral, experimentos foram realizados para descobrir como podem ser aplicadas à planta piloto real. Esse é o processo de Identificação, que é detalhado no Capítulo 3.

2.6 Simulação Computacional das Equações Não Lineares

Um modelo no estilo diagrama de blocos no *software* Simulink é mostrado na Figura 2.4.

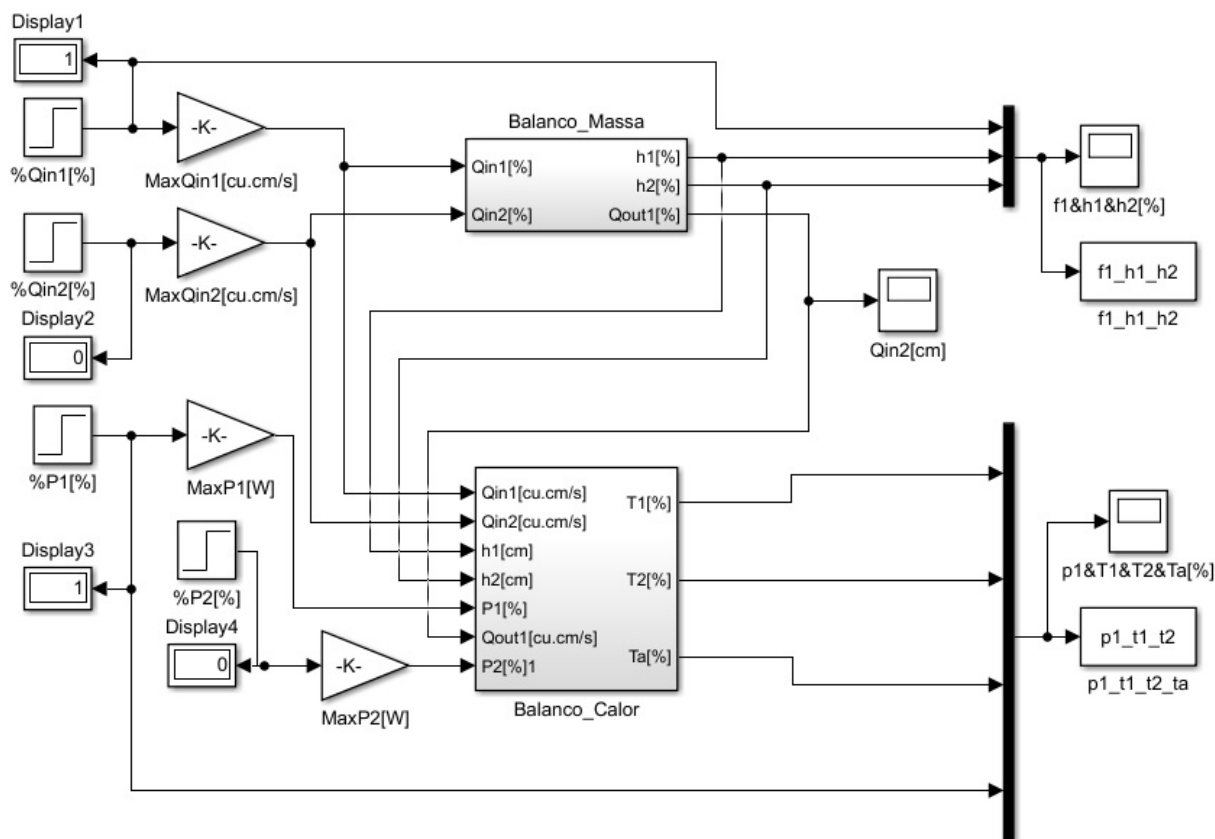


Figura 2.4: Diagrama de blocos que descrevem as equações do sistema no Simulink

Expandindo o bloco de balanço de massa, 'Balanco_Massa', é possível observar o conjunto das Equações 2.4 e 2.5 transformadas em diagrama. A Figura 2.5 contém esse diagrama.

Para testar a dinâmica no diagrama criado e apresentado na Figura 2.4, um degrau de amplitude 1% foi aplicado na entrada q_1 , a vazão de entrada entregue pela Bomba 1. A Bomba 2 ficou desligada. O degrau em **B1**, ao passar pelo subsistema da Figura 2.5, gera uma resposta no formato evidenciado na Figura 2.6. Em algumas literaturas [16], a constante k'_3 da Equação 2.1 é considerada como sendo $\sqrt{2g}$, em que $g = 9,82 \text{ m/s}^2$ é a aceleração da gravidade.

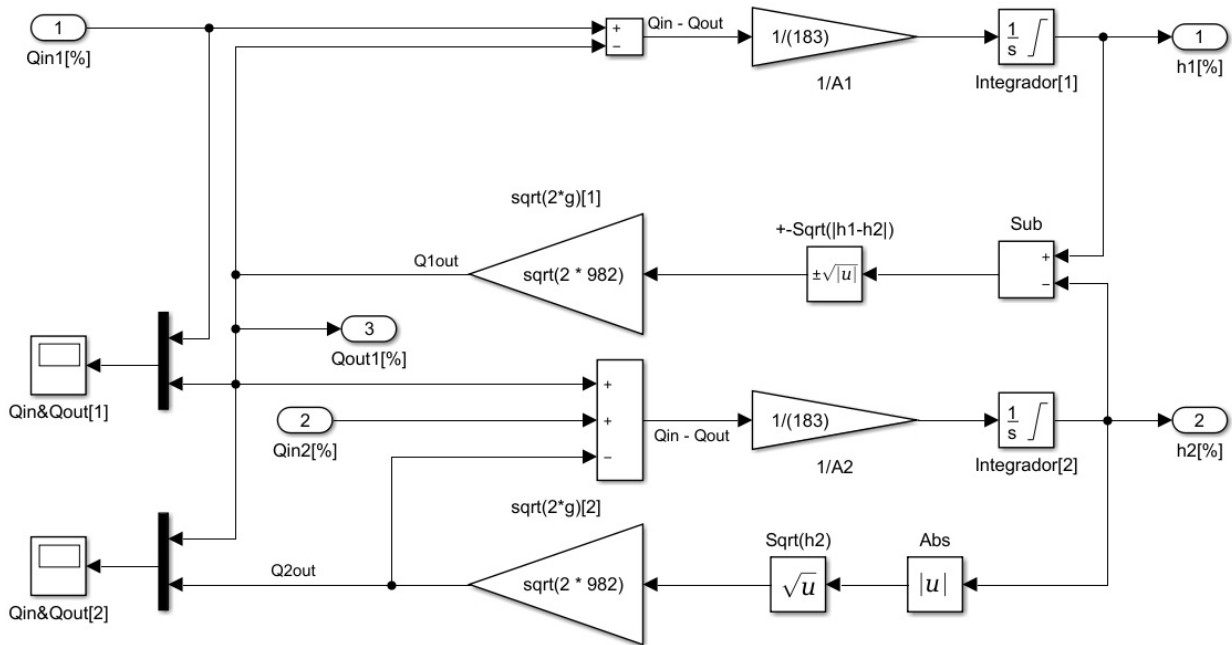


Figura 2.5: Diagrama das equações geradas pelo balanço de massa no Simulink

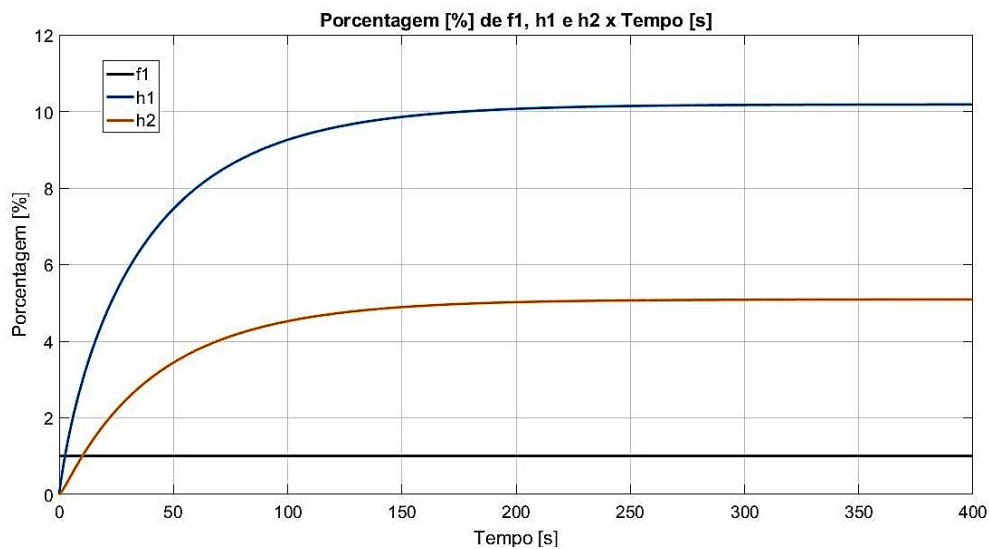


Figura 2.6: Resposta dos níveis de líquido h_1 e h_2 ao degrau unitário na vazão f_1

Analisando o gráfico da Figura 2.6, depreende-se que surge uma diferença de nível em estado estacionário, ao se acionar apenas a Bomba 1, configuração adotada nessa simulação. Esse é um resultado preliminar importante, como será comentado na Seção 3.3, em que o Tanque 1 funciona como *buffer* de entrada de água. Esse comportamento está de acordo com a Equação 2.4 em estado estacionário: se $q_1 \neq 0$, $h_1 \neq h_2$. Particularmente, se $q_1 > 0$, $h_1 > h_2$, como é verificado na figura.

Em outra configuração do mesmo sistema, foi testada a influência de ligar apenas a Bomba 2. O resultado é apresentado na Figura 2.7.

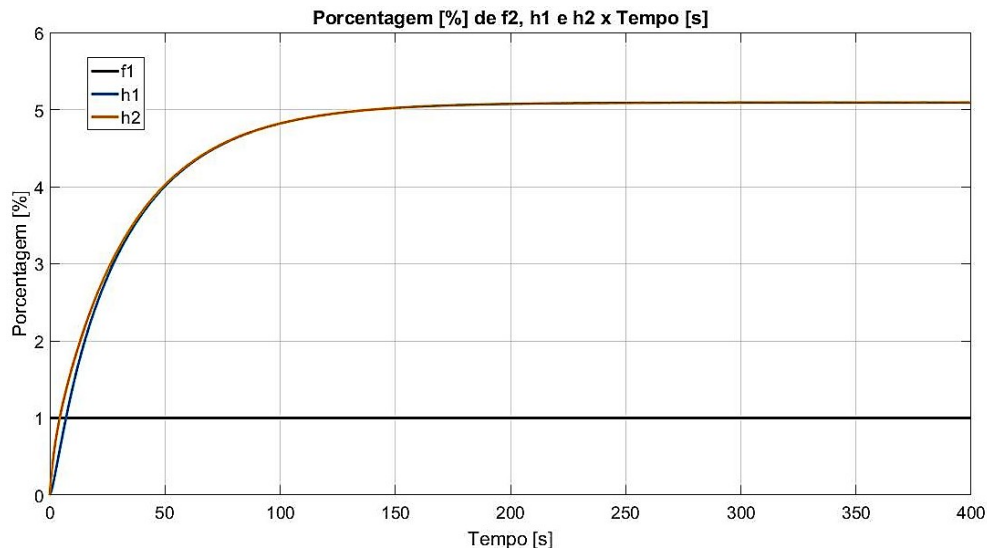


Figura 2.7: Resposta dos níveis de líquido h_1 e h_2 ao degrau unitário na vazão f_2

A diferença é que o comportamento de *buffer* não ocorre, pois na Equação 2.4 em estado estacionário: se $q_1 = 0$, $h_1 = h_2$, ou seja, os níveis nos dois tanques se igualam no regime estacionário após certo tempo. Portanto, as figuras de resposta do sistema simulado condizem com as equações obtidas pela análise do balanço de massa.

Com procedimento análogo ao realizado para o balanço de massa, expandindo o bloco de balanço de energia, ‘Balanco_Calor’, observa-se o conjunto da Equações 2.11, 2.12 e 2.13 transformadas em diagrama, mostrado na Figura 2.8.

Na configuração do diagrama da Figura 2.8, foi fornecido um degrau em $\%p1[\%]$, a potência de entrada da resistência presente no Tanque 1. Em resposta, o sistema forneceu um gráfico exibido na Figura 2.9, omitindo a variável T_a , que não é de interesse no momento.

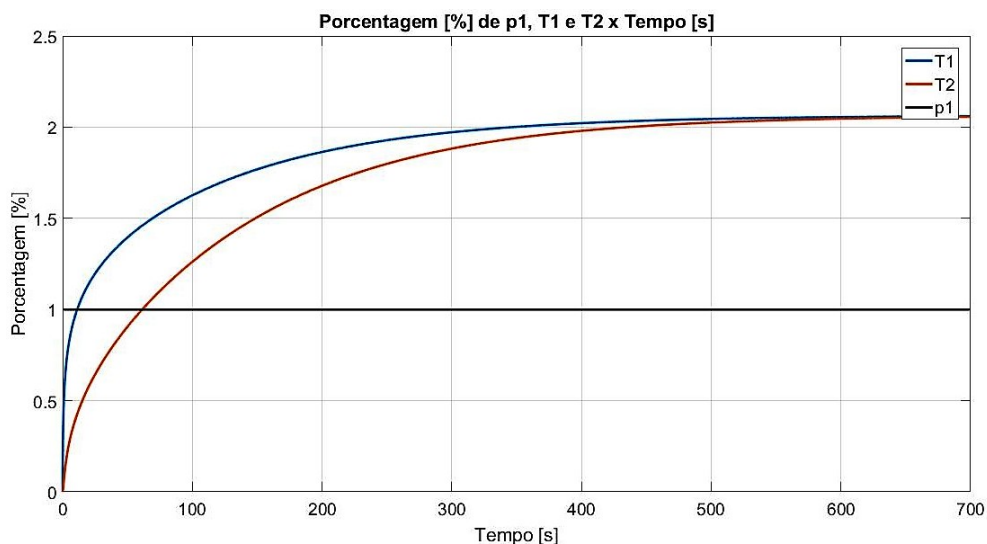


Figura 2.9: Resposta das temperaturas simuladas T_1 e T_2 ao degrau na potência p_1

No gráfico da Figura 2.9, os níveis de líquido foram mantidos constantes e iguais aos valores de regime mostrados na Figura 2.6 e nas mesmas condições, ou seja, apenas com a bomba 1 ligada, a potência 1 ligada, bomba 2 e unidade de aquecimento desligadas. Se analisamos as Equações 2.12 e 2.13 em estado estacionário, isto é, com derivadas igualadas a zero, a única maneira de balancear os termos é na condição $T_1 = T_2$, o que condiz com o regime estacionário do visto no gráfico. Neste trabalho, a parte experimental do balanço de energia não foi abordada, então restaria a comprovação dessa simulação computacional apresentada para trabalhos futuros.

As constantes utilizadas nesse modelo foram a área de seção transversal dos tanques, e algumas suposições, como para o valor da gravidade e da densidade da água. Essas aproximações não correspondem identicamente aos parâmetros verdadeiros da planta piloto, pois são provenientes de várias simplificações. No entanto, ao criar um diagrama de blocos para o sistema, alguns conhecimentos acerca de sua dinâmica foram gerados. Por exemplo, a área A está diretamente relacionada com a constante de tempo das respostas tanto de nível quanto de temperatura. Esse comportamento é esperado, pois é mais demorado encher um tanque largo e também aquecer a água em seu interior. As investigações deste trabalho não foram direcionadas a essa simulação computacional criada para abstrair o sistema, mas sim a partir da análise do comportamento experimental. O equacionamento originado da fenomenologia do processo serviu para criar um modelo simplificado para a identificação caixa-cinza. Em outras palavras, constantes específicas como a área, a densidade da água, a gravidade, não foram identificadas, apenas parâmetros genéricos de um modelo mais elementar. No entanto, pode ser feita uma identificação baseada nos parâmetros estruturais da planta em trabalhos futuros.

Tanto na Figura 2.6 como na 2.9, há dois pontos de interesse a se observar. Um deles é o ganho da resposta, i.e., quanto a variável avaliada aumenta em seu valor com um estímulo, uma entrada. E o outro ponto é a constante de tempo, que trata do quanto demorada é a chegada da variável nesse valor final. Obtida uma previsão do ganho e da constante de tempo do sistema teórico simulado, após a identificação feita no Capítulo 3, espera-se conhecer o comportamento real do processo quanto a esses dois tópicos.

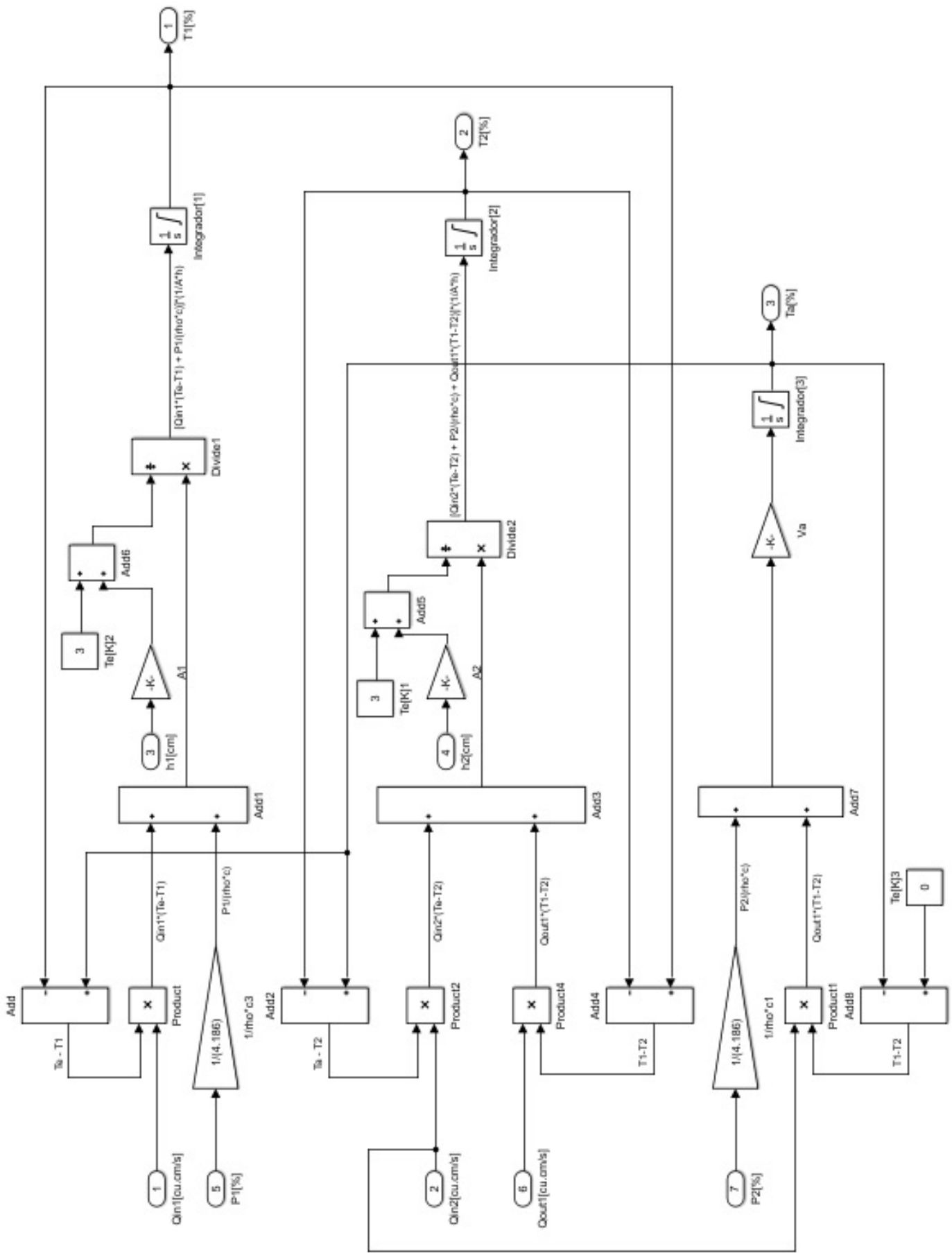


Figura 2.8: Diagrama simplificado das equações geradas pelo balanço de energia

Capítulo 3

Resultados Experimentais - Identificação e Validação

A modelagem apresentada no Capítulo 2 foi realizada para melhor atender ao comportamento físico da planta piloto. No entanto, é inevitável que haja diversas particularidades não abarcadas por esse modelo, tais como não linearidades. Por exemplo, algumas literaturas [17] descrevem como devem ser obtidas as constantes k'_3 e k'_4 nas equações de vazão de saída como a Equação 2.2. Sabe-se que k'_3 é influenciada pela área de seção transversal tanto da base do tanque quanto da tubulação por onde sai o líquido, e ainda que depende da gravidade em uma relação de raiz quadrada. No entanto, ao considerar esse formato para a constante, o resultado do comportamento do sistema ou do processo pode não ser como o esperado, devido a particularidades não consideradas no modelo. Para lidar com essa situação, realiza-se a identificação do sistema ou do processo em questão, elaborando ensaios que servem para calcular os parâmetros presentes nas equações. Essas particularidades vão desde uma espessura não considerada de um tanque, até o desprezo das perdas de calor para meios externos, e afetam em maior ou menor grau os parâmetros que estarão presentes nas equações finais obtidas.

Além das não linearidades, o sistema ou processo pode possuir naturalmente a impossibilidade de tratar diretamente com uma variável ou outra. No caso da planta piloto deste trabalho, não se trabalha diretamente com vazões no caso das variáveis controladas, como apresentado na Seção 2.3. Em vez disso, a variável disponível para a operação na planta de fato é o acionamento da inversão de frequência, que é responsável por reduzir ou aumentar o giro do motor de indução, que por sua vez controla a bomba hidráulica, só então resultando em uma vazão. Ou seja, ao invés das vazões fornecidas pelas bombas **B1** e **B2**, q_1 e q_2 , utiliza-se frequências de inversão, f_1 e f_2 , para os inversores **I1** e **I2**, respectivamente.

A planta piloto apresenta ainda a particularidade de que todas as variáveis, sejam elas medidas ou manipuladas, estão no formato de porcentagem (entre 0 e 100%), decisão que visa simplificar o tratamento das variáveis, tornando-o mais intuitivo. Portanto, em vez de

informar que o nível de líquido h_1 estava em 80 cm, informa-se que ele estava em 70%, e assim por diante, para todas as variáveis.

3.1 Parâmetros das Equações de Balanço de Massa

As primeiras análises foram feitas apenas para o balanço de massa. O conhecimento pode ser extrapolado para o balanço de energia, utilizando-se dos mesmos experimentos e métodos de análise, como será descrito posteriormente. Os experimentos e as investigações relacionados ao balanço de energia ficarão para trabalhos futuros.

Para executar o processo de identificação, simplifica-se as equações de estado, tendo em vista os formatos modelados no Capítulo 2. Ou seja, as Equações 2.4, 2.5, 2.11, 2.12, e 2.13 tiveram seu comportamento paramétrico generalizado para a identificação. As novas equações ficaram com a seguinte forma:

Equações do balanço de massa simplificadas para identificação:

- Balanço de massa no Tanque 1, com $k_3 = \frac{k'_3}{A}$:

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{1}{A} q_1(t) - k_3 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)}. \quad (3.1)$$

- Balanço de massa no Tanque 2, com $k_4 = \frac{k'_4}{A}$:

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{1}{A} q_2(t) + k_3 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} - k_4 \sqrt{h_2(t)}. \quad (3.2)$$

Equações do balanço de energia simplificadas para identificação:

- Balanço de energia no Tanque 1:

$$\left(\frac{A dh_1(t)}{dt} \right) \frac{dT_1(t)}{dt} = q_1(t)(T_r - T_1(t)) - k'_3 (T_1(t) - T_2(t)) \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} + \frac{p_1(t)}{c\rho}. \quad (3.3)$$

- Balanço de energia no Tanque 2:

$$\left(\frac{A dh_2(t)}{dt} \right) \frac{dT_2(t)}{dt} = q_a(t)(T_a(t) - T_2(t)) + k'_3 (T_1(t) - T_2(t)) \sqrt{h_1(t) - h_2(t)}. \quad (3.4)$$

- Balanço de energia na Unidade de Aquecimento:

$$V_a \frac{dT_a(t)}{dt} = q_2(t)(T_r - T_a(t)) + \frac{p_2(t)}{c\rho}. \quad (3.5)$$

3.1.1 Relação entre Vazão (Q) e Frequência (F)

Como dito anteriormente, algumas variáveis são tratadas de forma diferente daquela proposta na equação modelada, principalmente por questões de implementação física. No caso das vazões presentes nas equações do balanço de massa, não é possível lidar com elas diretamente. Essa diferença entre equação modelada e experimental é presente no acionamento das bombas do sistema. Não se trabalha com vazões na maneira que a planta piloto foi implementada, mas sim com frequências, para ativar os inversores que, aí sim, acionam as bombas. Considerou-se então, para fins de simplicidade do projeto, que a relação entre vazão q e frequência f é apenas uma constante, sem dinâmicas ou atrasos. Essa hipótese é simplória, tendo em vista que há várias não linearidades que porventura surgiriam entre a vazão e a frequência, mas para os fins deste trabalho foi a decisão tomada, e algumas dessas não linearidades são consideradas na relação final entre nível de líquido h e frequência f . A equação que relaciona vazão q e frequência de inversão f , ambos dados em porcentagem [%], pode então ser escrita como:

$$q(t) = k f(t), \quad k \text{ constante.} \quad (3.6)$$

Essa decisão implica que, ao invés de considerar as entradas do balanço de massa como vazões, na verdade são consideradas frequências de inversão. Em outras palavras, o nível de líquido do tanque aumenta ao receber uma frequência de inversão, f , e não mais uma vazão, q , nessa nova abordagem prática.

Combinando as Equações 3.6 e 3.1, o novo balanço de massa para o Tanque 1 é obtido:

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = k_1 f_1(t) - k_3 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)}, \quad (3.7)$$

em que $k_1 f_1(t) = \frac{1}{A} q_1(t)$.

Da mesma forma, combinando as Equações 3.6 e 3.2, o novo balanço de massa para o Tanque 2 é obtido:

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = k_2 f_2(t) + k_3 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} - k_4 \sqrt{h_2(t)}, \quad (3.8)$$

em que $k_2 f_2(t) = \frac{1}{A} q_2(t)$.

3.2 Linearização

Para executar a identificação, optou-se por lidar com o sistema de forma linearizada, como uma primeira abordagem para conhecer sua dinâmica e suas características. Dessa forma, as Equações 3.7 e 3.8 foram linearizadas em torno de um ponto de operação, e transformadas em variáveis de desvio nesse processo, de forma a facilitar o tratamento das

equações, como é feito e explicado detalhadamente em algumas bibliografias [1] e [18]. Para caracterizar estado estacionário, onde são definidos os pontos de operação, basta considerar a situação em que $dh_1/dt = 0$ e $dh_2/dt = 0$, isto é, não há variação no nível dos tanques. Além disso, a solução das equações considerando essa condição fornecem h_{1e} e h_{2e} para f_{1e} e f_{2e} dados.

A dependência temporal das variáveis nas equações a seguir será omitida. Assim, as equações do balanço de massa linearizadas para identificação são como segue, para o ponto de operação em estado estacionário $ee = \{h_1 = h_{1e}, h_2 = h_{2e}, f_1 = f_{1e}, f_2 = f_{2e}\}$:

- Nível de líquido no Tanque 1:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= k_1 f_1 - k_3 \sqrt{(h_1 - h_2)} = G_1(h_1, h_2, f_1), \\ \frac{d(h_1 - h_{1e})}{dt} &= \left. \frac{\partial G_1}{\partial h_1} \right|_{ee} (h_1 - h_{1e}) + \left. \frac{\partial G_1}{\partial h_2} \right|_{ee} (h_2 - h_{2e}) + \left. \frac{\partial G_1}{\partial f_1} \right|_{ee} (f_1 - f_{1e}), \\ \frac{d\tilde{h}_1}{dt} &= \left[\frac{-k_3}{2\sqrt{h_{1e} - h_{2e}}} \right] \tilde{h}_1 + \left[\frac{k_3}{2\sqrt{h_{1e} - h_{2e}}} \right] \tilde{h}_2 + k_1 \tilde{f}_1, \\ \frac{d\tilde{h}_1}{dt} &= \left[\frac{-k_3}{2\sqrt{h_{1e} - h_{2e}}} \right] \tilde{h}_1 + \left[\frac{k_3}{2\sqrt{h_{1e} - h_{2e}}} \right] \tilde{h}_2 + k_1 \tilde{f}_1. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Considerando $\alpha = \left[\frac{k_3}{2\sqrt{h_{1e} - h_{2e}}} \right]$, reescreve-se a Equação 3.9:

$$\frac{d\tilde{h}_1}{dt} = -\alpha \tilde{h}_1 + \alpha \tilde{h}_2 + k_1 \tilde{f}_1. \quad (3.10)$$

A Equação 3.10 está no formato utilizado na identificação e na validação do modelo. Deseja-se obter o valor dos parâmetros α e k_1 que melhor se adequem aos dados obtidos experimentalmente.

- Nível de líquido no Tanque 2:

$$\begin{aligned} \frac{dh_2(t)}{dt} &= k_2 f_2(t) + k_3 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} - k_4 \sqrt{h_2(t)} = G_2(h_1, h_2, f_2), \\ \frac{d(h_2 - h_{2e})}{dt} &= \left. \frac{\partial G_2}{\partial h_1} \right|_{ee} (h_1 - h_{1e}) + \left. \frac{\partial G_2}{\partial h_2} \right|_{ee} (h_2 - h_{2e}) + \left. \frac{\partial G_2}{\partial f_2} \right|_{ee} (f_2 - f_{2e}), \\ \frac{d\tilde{h}_2}{dt} &= \left[\frac{k_3}{2\sqrt{h_{1e} - h_{2e}}} \right] \tilde{h}_1 \\ &+ \left[\frac{-k_3}{2\sqrt{h_{1e} - h_{2e}}} - \frac{-k_4}{2\sqrt{h_{2e}}} \right] \tilde{h}_2 + k_2 \tilde{f}_2, \\ \frac{d\tilde{h}_2}{dt} &= \left[\frac{k_3}{2\sqrt{h_{1e} - h_{2e}}} \right] \tilde{h}_1 + \left[\frac{-k_3}{2\sqrt{h_{1e} - h_{2e}}} - \frac{-k_4}{2\sqrt{h_{2e}}} \right] \tilde{h}_2 + k_2 \tilde{f}_2. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Considerando $\beta = \left[\frac{k_4}{2\sqrt{h_{2e}}} \right]$, e a expressão já descrita de α , reescreve-se a Equação 3.11:

$$\frac{d\tilde{h}_2}{dt} = \alpha \tilde{h}_1 + (-\alpha - \beta) \tilde{h}_2 + k_2 \tilde{f}_2. \quad (3.12)$$

A Equação 3.12 também está no formato utilizado na identificação e na validação do modelo. Os parâmetros β e k_2 são os outros de interesse, cujo valor se deseja obter.

A partir deste ponto em que as equações foram linearizadas, para simplificar a notação, o símbolo $\tilde{\cdot}$ das variáveis incrementais será omitido.

3.3 Identificação

A identificação foi feita no *software* Matlab, tendo como base a função `greyest()`, que estima um modelo em caixa-cinza a partir de um conjunto de dados de entrada e saída. Para que isso fosse possível, foi necessário agregar as Equações 3.10 e 3.12 em um sistema no espaço de estados, no formato da Equação 3.13:

$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t).\end{aligned}\tag{3.13}$$

Para a aplicação deste trabalho, as variáveis de estado $x(t)$ são o vetor dos níveis de líquido, $[h_1; h_2]^T$; as entradas $u(t)$ são o vetor das frequências de inversão, $[f_1; f_2]^T$; e as saídas são os níveis de líquido, $[h_1; h_2]^T$. As Equações 3.10 e 3.12, aplicadas ao formato da Equação 3.13, resultam em:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha \\ \alpha & -\alpha - \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix},\end{aligned}\tag{3.14}$$

ou seja:

$$A = \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha \\ \alpha & -\alpha - \beta \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = 0.$$

Identificar o sistema, nas condições apresentadas, significa encontrar os valores de α , β , k_1 e k_2 , como já foi discutido. A identificação caixa-cinza consiste justamente em fornecer essa estrutura matricial esperada para o modelo que se quer conhecer. O *script* criado no Matlab para fazer a identificação linear dos dados experimentais e validá-los é fornecido no Anexo I. Para tornar isso possível, foram projetados alguns ensaios, sendo os dois primeiros destinados a se obter informações acerca da funcionalidade característica da planta piloto, como: descobrir se ela funciona melhor com degraus de longa excursão, degraus de amplitude incremental, variações rápidas, lentas, etc. Dois desses ensaios preliminares serão descritos em seguida:

- Ensaio 1:** Para investigar a relação entre entradas de frequência do inversor e respostas de nível de líquido, foram levantadas curvas da dinâmica desse processo. Um valor de frequência era fornecido, e os valores de nível de líquido eram colhidos como dados. Os experimentos foram realizados tanto com apenas uma bomba ligada, quanto com as duas ao mesmo tempo. O que se descobriu foi que cada faixa de operação gerou uma lista de parâmetros de modelo. O degrau de longa excursão típico deste ensaio fez com que o comportamento do sistema linearizado fosse imprevisível, pois na linearização trabalha-se com pequenos desvios do ponto de operação. Essa é uma observação que já se esperava de um sistema não linear, quanto mais se distancia do ponto de operação, mais distante é o comportamento com relação àquilo que foi previsto. Um exemplo de resultado de um experimento com essas características é mostrado na Figura 3.1.

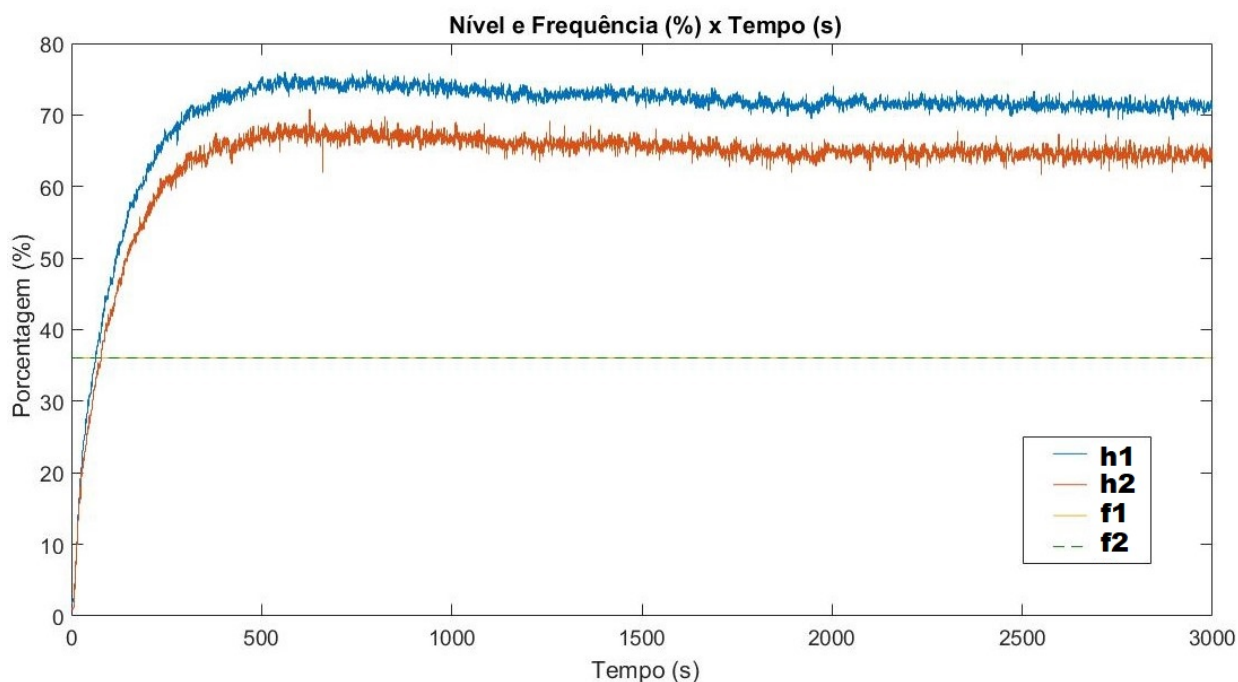


Figura 3.1: Resultado do Ensaio 1

As informações principais que se tira do Ensaio 1 são que a constante de tempo da bomba para atingir dado ponto de operação é de cerca de 300 s, e que para cada valor de frequência de inversão, há um patamar de nível de líquido aproximado que se atinge. Esses resultados foram levados adiante para projetar os próximos ensaios.

- Ensaio 2:** Em outro ensaio, o comportamento da planta foi investigado com relação aos pontos de operação, para frequências que eram incrementadas a cada intervalo de tempo fixo. Esperava-se com esse ensaio descobrir como o sistema se comportava ao ser levado de um ponto de operação a outro, e a dinâmica que regia esse processo, só que agora com degraus de frequência com menor excursão. Identificou-se novamente após o ensaio que para cada ponto de operação havia uma lista de parâmetros de modelo diferente para a planta piloto; em outras palavras, há características dinâmicas

e estáticas diferentes em cada ponto de operação. O objetivo do teste era descobrir como o ganho e a constante de tempo do sistema mudavam de acordo com a mudança da frequência, em uma forma de mapeamento da zona de operação. A informação que se verificou foi que os ganhos com cada mudança de ponto de operação não cresciam proporcionalmente, devido a não linearidades; isto é, um degrau unitário em um ponto de operação tem resposta diferente do degrau unitário em outro ponto, mesmo em termos incrementais. Assim, criar um modelo que funcionasse em uma grande zona de operação não seria possível para essa planta. Exemplos de resultados obtidos com este ensaio são apresentados nas Figuras 3.2 e 3.3.

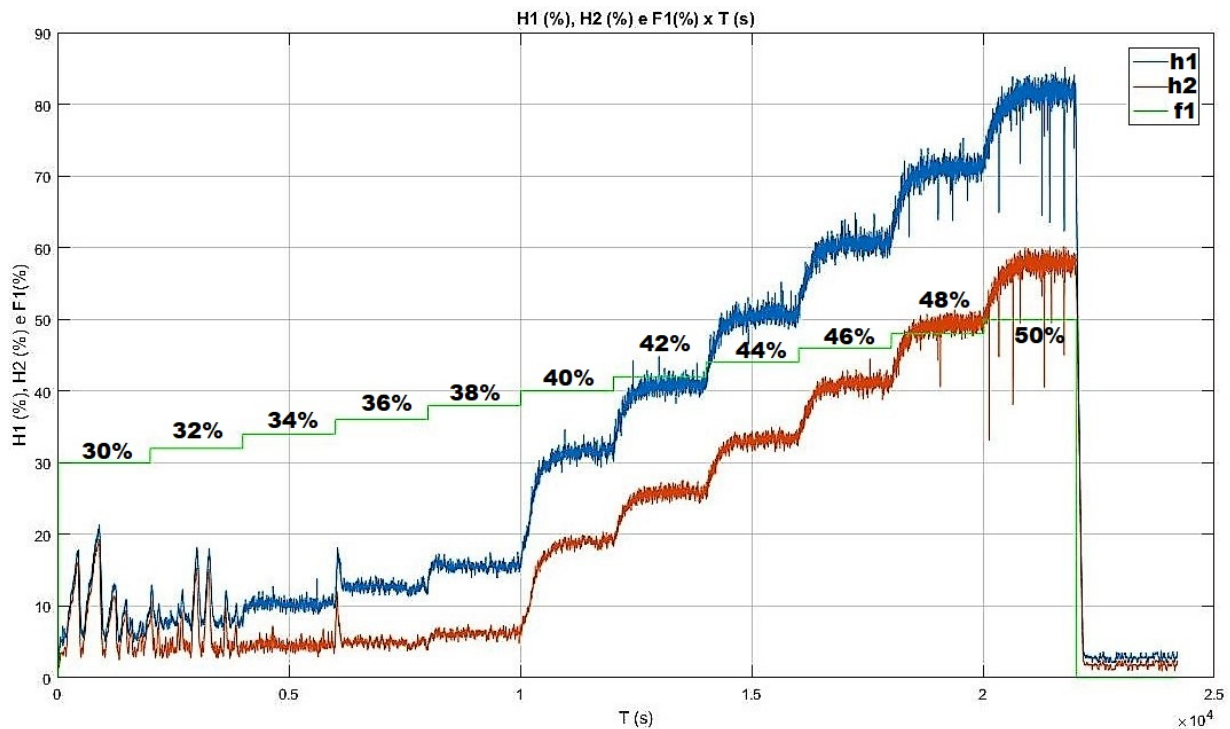


Figura 3.2: Resultado do Ensaio 2 com apenas **B1** ligada, degraus de 2 em 2%

Na Figura 3.2 verifica-se o comportamento da planta com apenas a bomba B1 ligada. Como $h_1 > h_2$ durante todo tempo pode-se afirmar que o Tanque 1 funciona como um buffer ou acumulador [12] para o Tanque 2. Isso se deve ao fato de que o Tanque 1 não tem despejo de água individual para o reservatório de água, como o Tanque 2. O resultado mostrado nessa figura foi proveniente de um ensaio com degraus incrementados de 2 em 2%.

Na Figura 3.3, apenas a bomba B2 está ligada. É possível notar que os níveis dos dois tanques são aproximadamente iguais durante todo o tempo, pois o Tanque 2, que recebe líquido da bomba **B2** ligada, possui seu próprio despejo. Os Tanques 1 e 2 se comportam como vasos comunicantes nessa configuração. O resultado mostrado nessa figura foi proveniente de um ensaio com degraus incrementados unitariamente.

Alguns aspectos da planta piloto foram descobertos com o ensaio da Figura 3.3: há

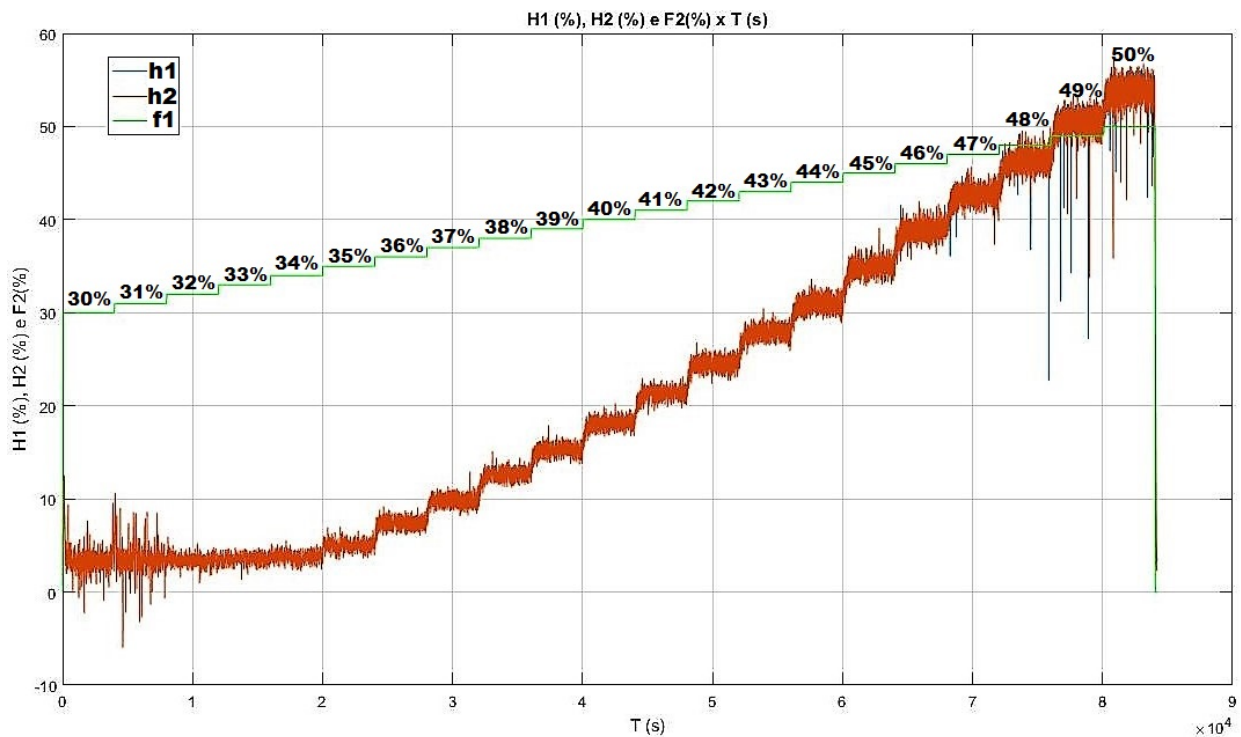


Figura 3.3: Resultado do Ensaio 2 com apenas **B2** ligada, degraus unitários de porcentagem

uma zona morta de operação de frequências entre 30 e 35%, e um comportamento irregular perto de 30%. Até 32%, a frequência gera uma resposta muito acidentada do nível de líquido, desproporcional ao que esperaria dessa faixa ao compará-la às demais. Esse comportamento foi entendido como uma não-linearidade do sistema, mais precisamente do inversor de frequência. Sendo assim, a zona de 30 a 35% foi evitada nos ensaios. Verifica-se também pelas duas imagens que na zona de 48 a 50% há a ocorrência de vários *outliers*, o que indica falha no sensor. Essa zona de operação também foi evitada nos ensaios posteriores. Portanto, a resposta é relevante na faixa de 35% a 48%, com as bombas ligadas individualmente. Porém, imaginou-se que ao ligar as duas bombas ao mesmo tempo essa faixa seria reduzida, pois continua havendo apenas uma vazão de saída no sistema. Essa hipótese foi testada no Ensaio 3.

Cada faixa de operação testada foi isolada e foram feitas tentativas de identificar cada função de transferência de primeira ordem que regia essas faixas, como mostra a Figura 3.4.

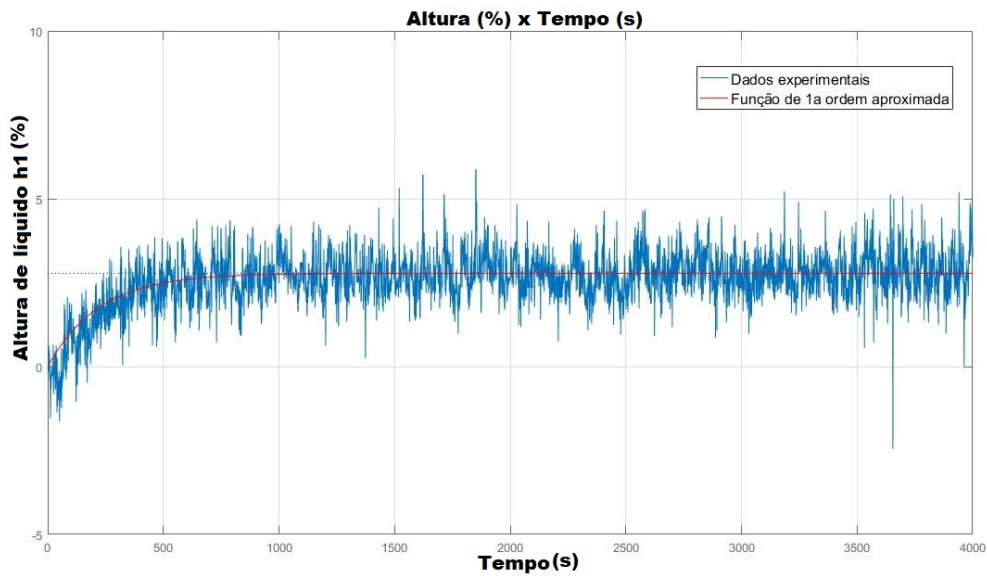


Figura 3.4: Gráfico de identificação de faixa de operação no Ensaio 2

O mesmo gráfico da Figura 3.4 foi feito para cada valor de entrada de frequência, e os ganhos identificados para cada faixa, com a *toolbox* de identificação de sistemas do Matlab. O ganho k_3 foi disposto graficamente para tentar descobrir como ele variava em função da frequência do inversor. O resultado é mostrado na Figura 3.5.

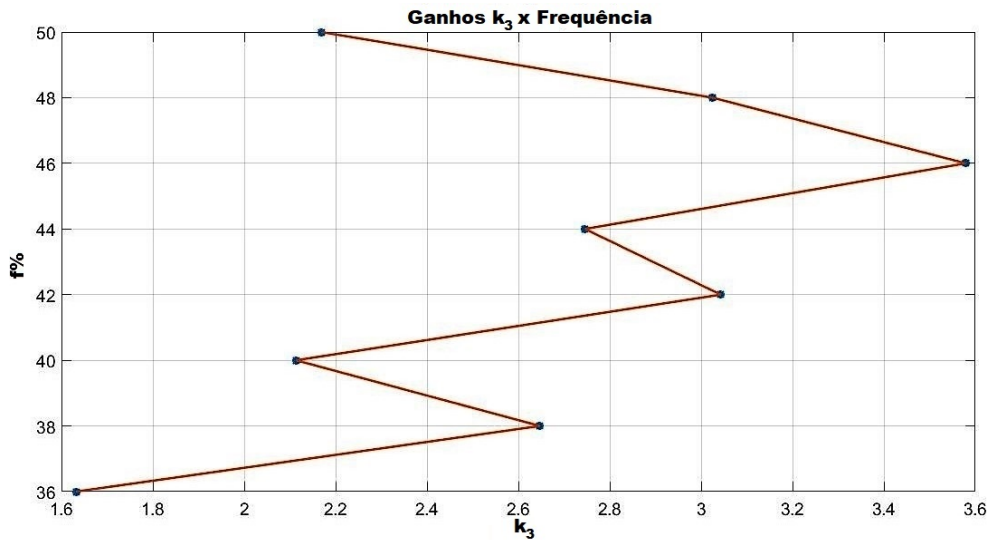


Figura 3.5: Relação entre frequência e ganhos k_3 com relação ao nível de líquido

Como foi explicado, esperava-se descobrir com esse ensaio se degraus de mesmo tamanho em faixas diferentes originavam resultados iguais. Por exemplo, se o sistema for estimulado aumentando a frequência f_1 em 1% de 35 a 36%, o nível sobe a mesma quantidade do caso em que se aumenta f_1 de 40 a 41%? Ao analisar a Figura 3.5 que mapeia esses ganhos, pode-se concluir que não é o caso. Os parâmetros do modelo assumem valores diferentes para cada ponto de operação e tais valores não seguem um

padrão. A partir desse resultado, foi tomada a decisão de identificar o comportamento da planta piloto somente ao redor de um ponto de operação, e com pequenas variações de entrada.

- **Ensaio 3:** O ensaio realizado utilizou como frequência das bombas um sinal PRBS, *PseudoRandom Binary Sequence*, e a resposta da planta foi investigada computacionalmente. O sinal PRBS é aleatório, de forma que possibilita conhecer a dinâmica do sistema a ele submetido e oscila apenas entre dois valores em torno do ponto de operação escolhido. O sinal PRBS foi aplicado às duas entradas, f_1 e f_2 , em ambas com ponto de operação 36% e margem de 1%, ou seja, variando de 35 a 37%, que é a faixa em que os limites físicos da planta piloto permitiam, com as duas bombas ligadas. Valores acima dessa faixa saturavam o nível do líquido, desarmando as bombas; valores abaixo dessa faixa não eram suficientes conseguir bombear a água. Essas informações foram obtidas experimentalmente, por meio das análises posteriores ao Ensaio 2.

O sinal PRBS em f_1 e f_2 e sua resposta em h_1 e h_2 foram aplicados à função `greyest()` do Matlab, e os parâmetros do modelo no espaço de estados conforme o modelo da Equação 3.14 foram calculados. Mais informações sobre a função podem ser encontradas no site de referência da MathWorks para `greyest()`:

<https://www.mathworks.com/help/ident/ref/greyest.html>.

Os gráficos, compreendendo sinais PRBS em f_1 e f_2 , e respostas h_1 e h_2 , foram traçados utilizando o Matlab, e podem ser visualizados na Figura 3.6.

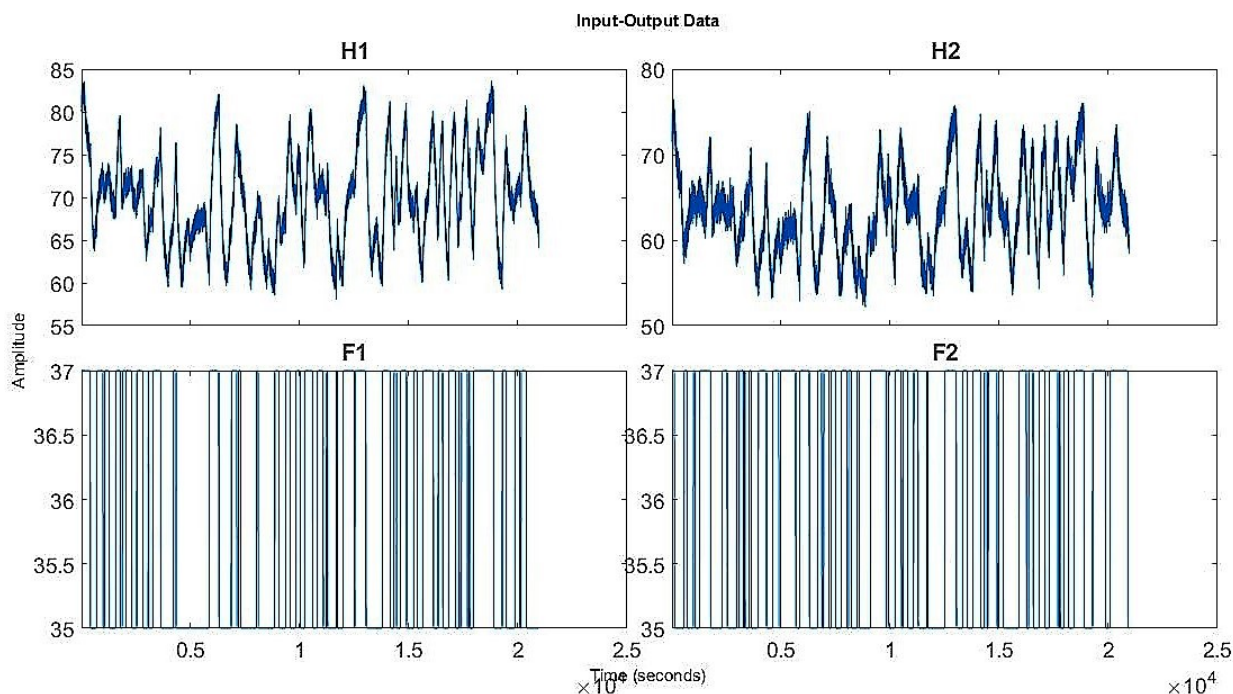


Figura 3.6: Dados do Ensaio 3

A partir dos dados da Figura 3.6 e da parametrização feita na Equação 3.14, a função `greyest()` foi implementada para encontrar o modelo caixa-cinza para o processo. Como sugere a literatura [11], dividiu-se o conjunto de dados do experimento em 70% dos dados para identificação e 30% para validação [10]. O ensaio, com suas entradas e saídas, é representado pela Figura 3.7.

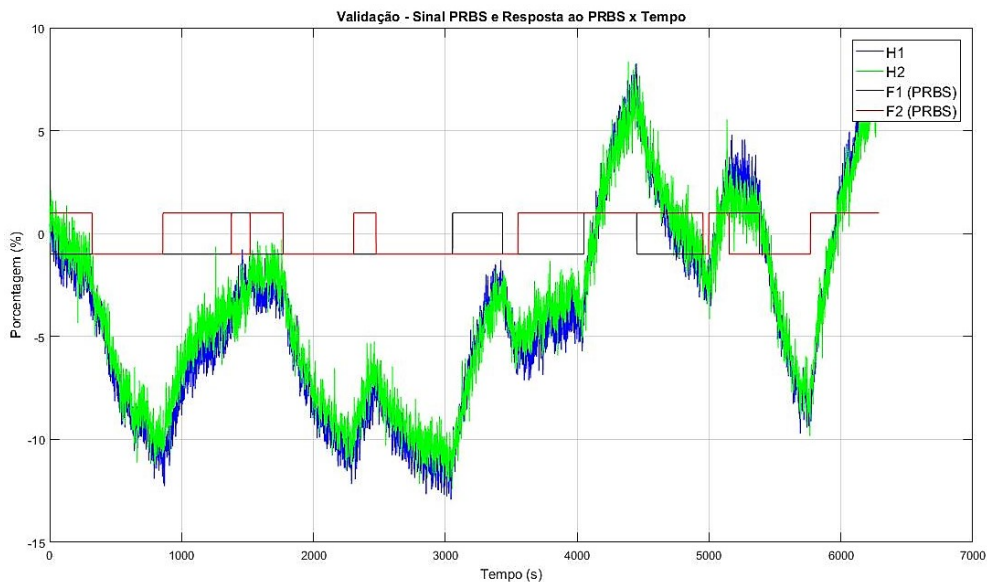


Figura 3.7: Validação do Ensaio 3

Os resultados gerados pela função, a partir dos dados de entrada e saída da Figura 3.7, são mostrados na Figura 3.8.

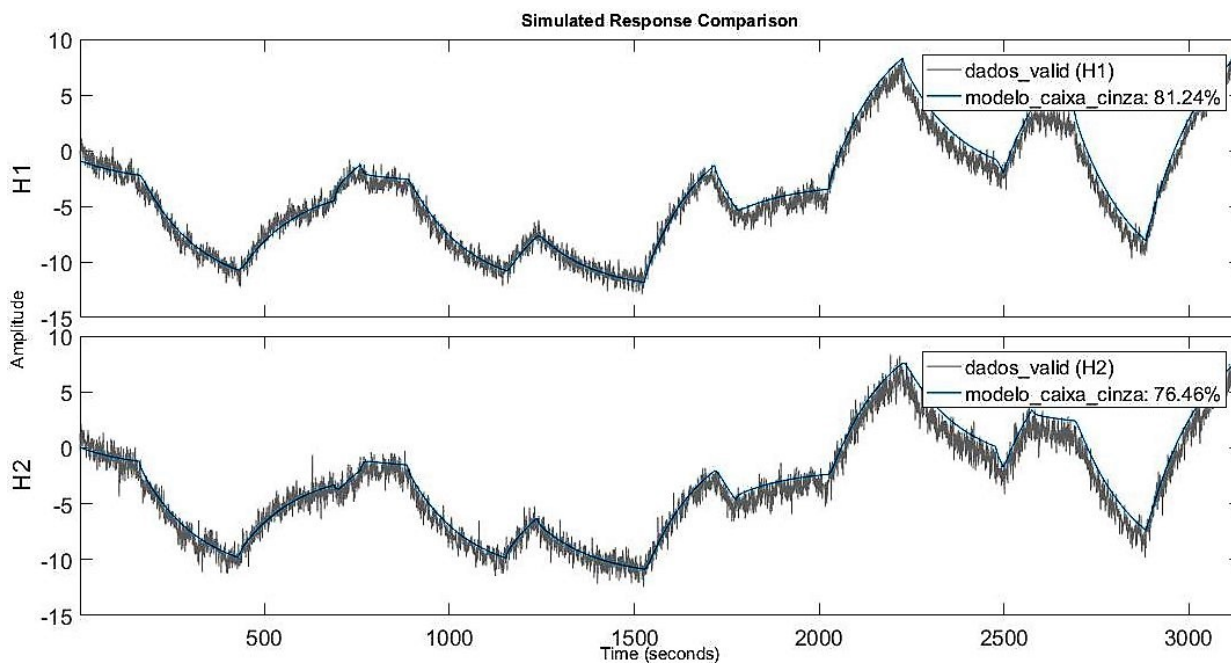


Figura 3.8: Resultado do Ensaio 3

A Figura 3.8 retrata as respostas em h_1 e h_2 dos dados experimentais em comparação com as respostas do modelo estimado em estilo caixa-cinza pelo Matlab. A aderência do nível h_1 estimado foi de 81,24%, enquanto que a do nível h_2 foi de 76,46%. A própria função `greyest()` fornece algumas métricas de avaliação do resultado, como FPE, Final Prediction Error, e MSE, Mean Squared Error, que mede o quão bem o modelo se encaixa nos dados. O FPE calculado pelo Matlab para o modelo da Figura 3.8 foi $FPE = 0,8995$, e o MSE foi $MSE = 2,852$.

A aderência calculada pelo Matlab é obtida segundo erro médio normalizado NRMSE, cuja fórmula é:

$$\text{aderencia(NRMSE)} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [h_{est}(i) - h(i)]^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (h_{est}(i) - \bar{h}_{est})^2}}, \quad (3.15)$$

em que h são dados de teste medidos, h_{est} são dados de referência estimados e \bar{h}_{est} é a média dos dados em h_{est} . Essa aderência pode ir de $-\infty\%$ (péssima aderência) até 100% (aderência perfeita).

No caso de MSE, seu valor pode ser obtido segundo erro quadrático médio, com expressão:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N [h(i) - h_{est}(i)]^2}{N}, \quad (3.16)$$

em que N é o número de amostras.

Os dados encontrados pela função foram:

$$\alpha = 0,08417; \beta = 0,01328; k_1 = 0,08963; k_2 = 0,06466.$$

Ressalta-se que os valores de k_3 e k_4 estão embutidos nos parâmetros α e β . Reescrevendo o modelo no espaço de estados com os parâmetros estimados, gerou-se o Modelo 1:

Espaço de Estados - **Modelo 1:**

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0,08417 & 0,08417 \\ 0,08417 & -0,09744 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,08963 & 0 \\ 0 & 0,06466 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

- **Ensaio 4:** Este experimento é uma variação do Ensaio 3, porém com a entrada f_1 recebendo um sinal PRBS, e a entrada f_2 nula. Ou seja, é uma situação em que apenas a bomba **B1** está ligada. O objetivo deste ensaio era descobrir se, em uma situação particular do Ensaio 3, em que $f_2 = 0$, o modelo identificado seria equivalente. Esperava-se que não, e, no caso de não ser, o que é alterado? Qual é a influência de desligar uma bomba na identificação do sistema? Essa configuração de ensaio permite

que o sinal f_1 possa atuar em uma faixa maior, já que o risco de vazamento de água e fechamento da chave de nível demora mais para chegar com apenas uma bomba. O ensaio foi feito com um sinal PRBS em f_1 que tem valores variando entre 35 e 45%, ou seja, valor médio 40% e variação de 5% em torno desse valor. Os 70% iniciais dos dados obtidos, ou seja, os dados da parte de identificação, são apresentados na Figura 3.9.

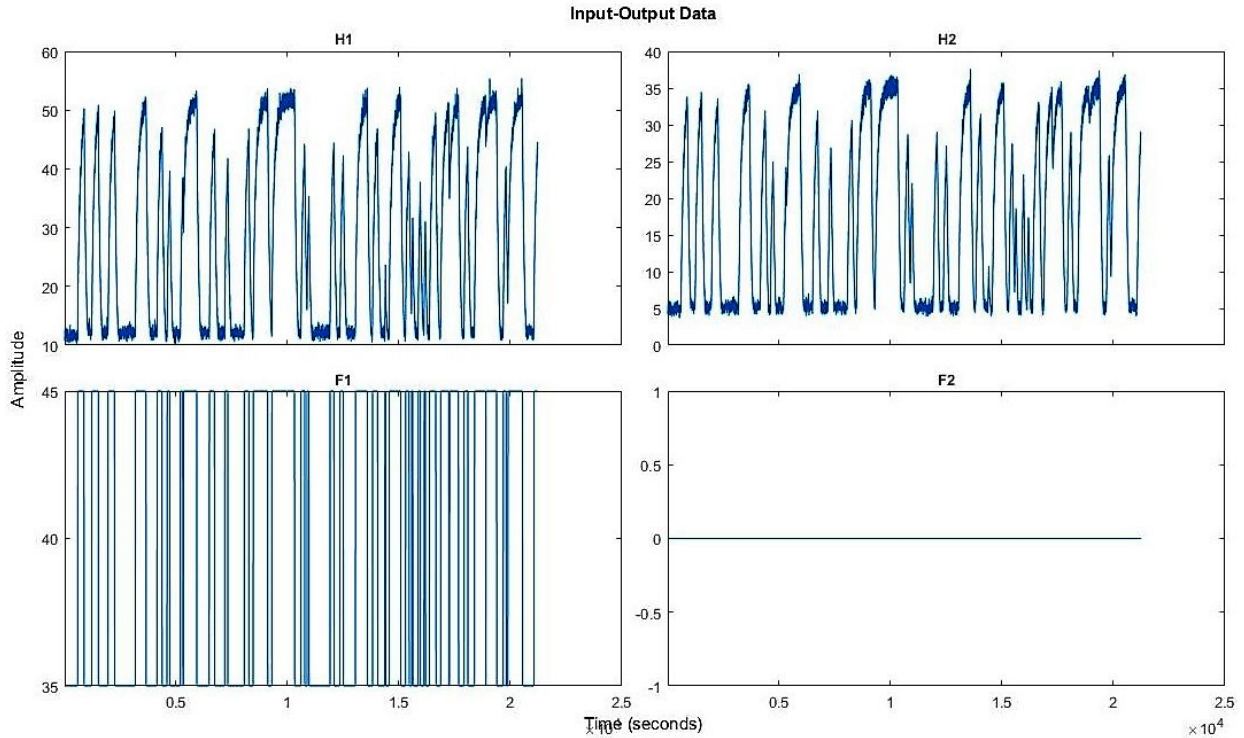


Figura 3.9: Dados do Ensaio 4

Os dados encontrados pela função `greyest()` na configuração do Ensaio 4 foram:

$$\alpha = 0,07463; \beta = 0,02697; k_1 = 0,07931; k_2 = 0.$$

O valor de k_2 resultou em zero pois esta é a constante que acompanha a entrada f_2 , que foi anulada. O Ensaio 4 gerou o Modelo 2, evidenciado na Equação 3.18.

Espaço de Estados - **Modelo 2:**

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,07463 & 0,07463 \\ 0,07463 & -0,1016 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,07931 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}.$$

A comparação entre o Modelo 2 e os dados de validação, os 30% finais do Ensaio 4, é mostrada na Figura 3.10. A entrada para a validação deste ensaio, em f_1 , está disposta na Figura 3.11.

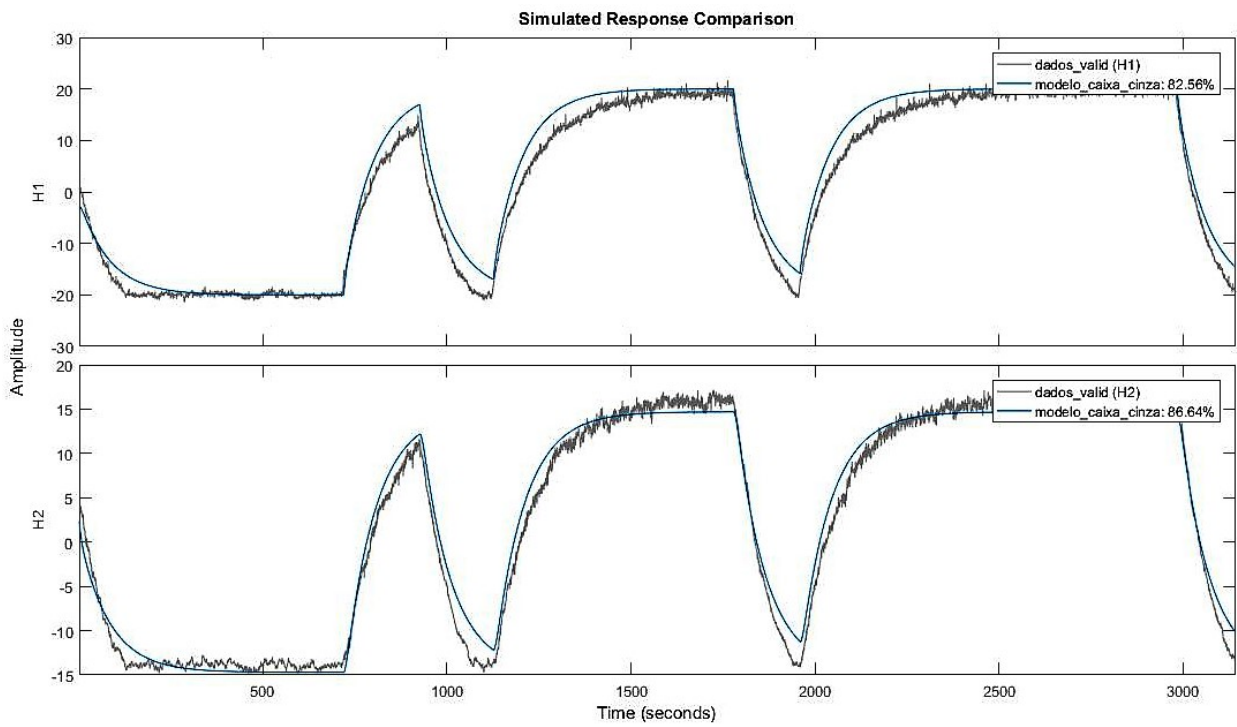


Figura 3.10: Resultado do Ensaio 4

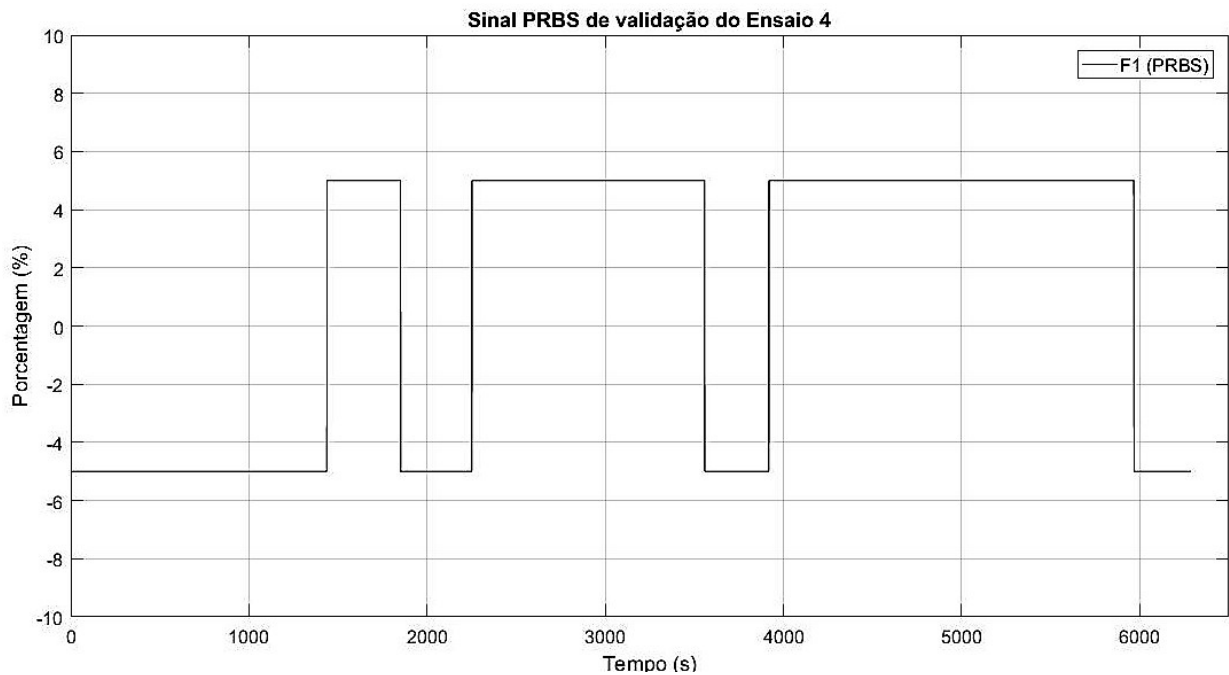


Figura 3.11: Entrada para validação do Ensaio 4

A aderência do nível h_1 estimado foi de 82,56%, enquanto que a do nível h_2 foi de 86,64%. O FPE calculado pelo Matlab para o Modelo 2 da Figura 3.10 foi $FPE = 5,954$, e o MSE foi $MSE = 10,01$.

- **Ensaio 5:** Este experimento também é uma variação do Ensaio 3, o que se altera é que

a entrada f_2 recebe um sinal PRBS, enquanto a entrada f_1 é nula. Em outras palavras, é uma situação em que apenas a bomba **B2** está ligada. O Ensaio 5 foi realizado no mesmo formato do Ensaio 4, aplicando um sinal PRBS cujos valores variavam entre 35% e 45%, ou seja, valor médio 40% e variação de 5% em torno desse valor. No entanto, esse sinal foi aplicado apenas à frequência de entrada f_2 . Os 70% iniciais dos dados obtidos, ou seja, os dados da parte de identificação, são apresentados na Figura 3.12.

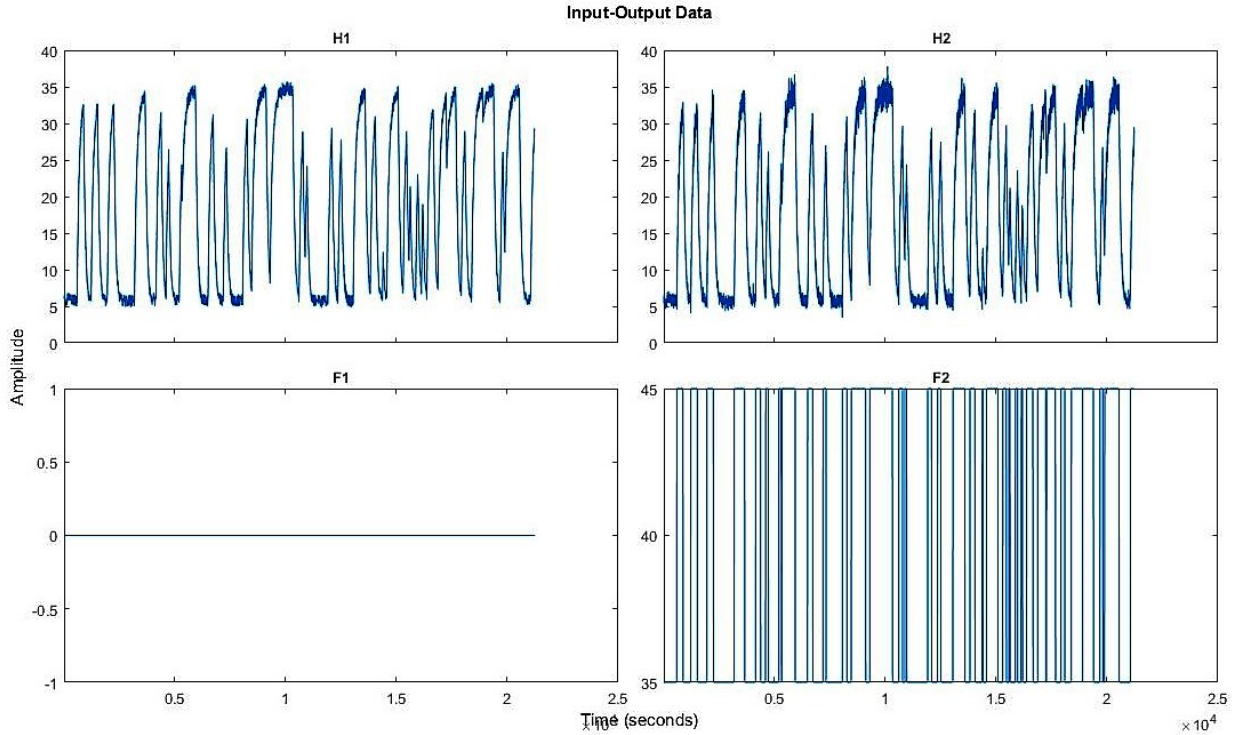


Figura 3.12: Dados do Ensaio 5

Os dados encontrados pela função `greyest()` na configuração do Ensaio 5 foram:

$$\alpha = 0,757; \beta = 0,02269; k_1 = 0; k_2 = 0,0629.$$

O valor de k_1 resultou em zero pois esta é a constante que acompanha a entrada f_1 , que foi anulada. O Ensaio 5 gerou o Modelo 3, evidenciado na Equação 3.19.

Espaço de Estados - **Modelo 3:**

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,757 & 0,757 \\ 0,757 & -0,7797 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,0629 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}.$$

A comparação entre o Modelo 3 e os dados de validação, os 30% finais do Ensaio

5, é mostrada na Figura 3.13. A entrada para a validação deste ensaio, em f_2 , está disposta na Figura 3.14.

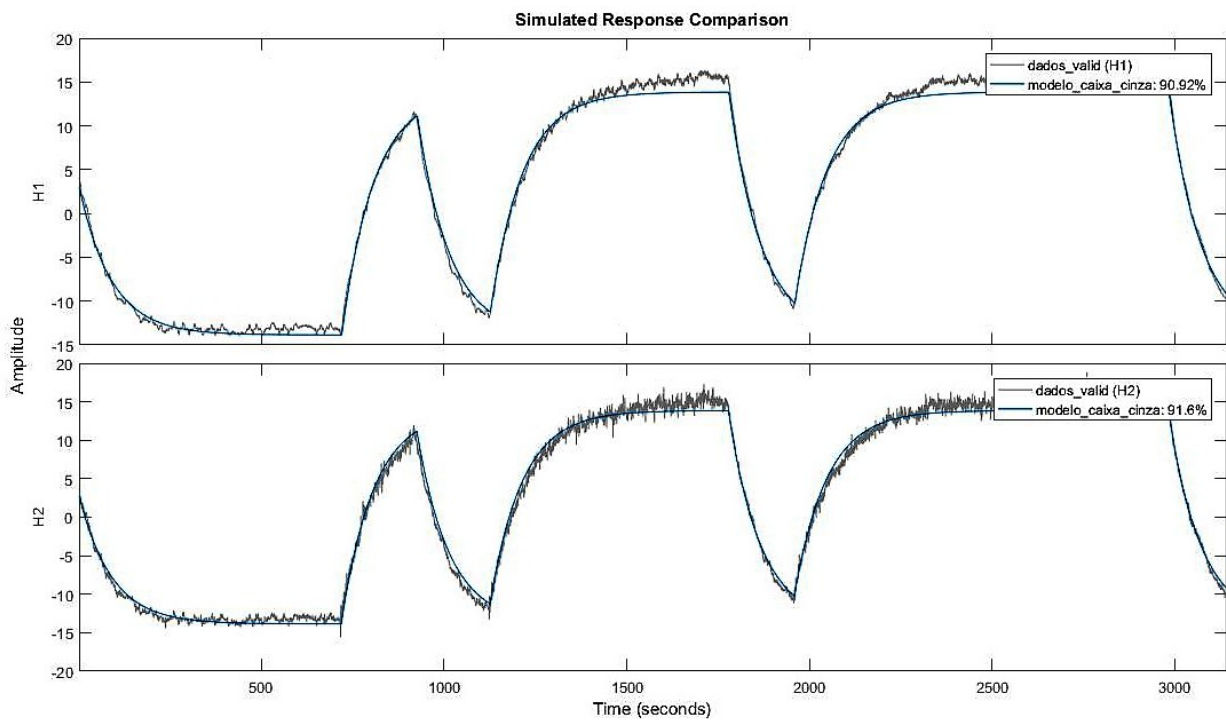


Figura 3.13: Resultado do Ensaio 5

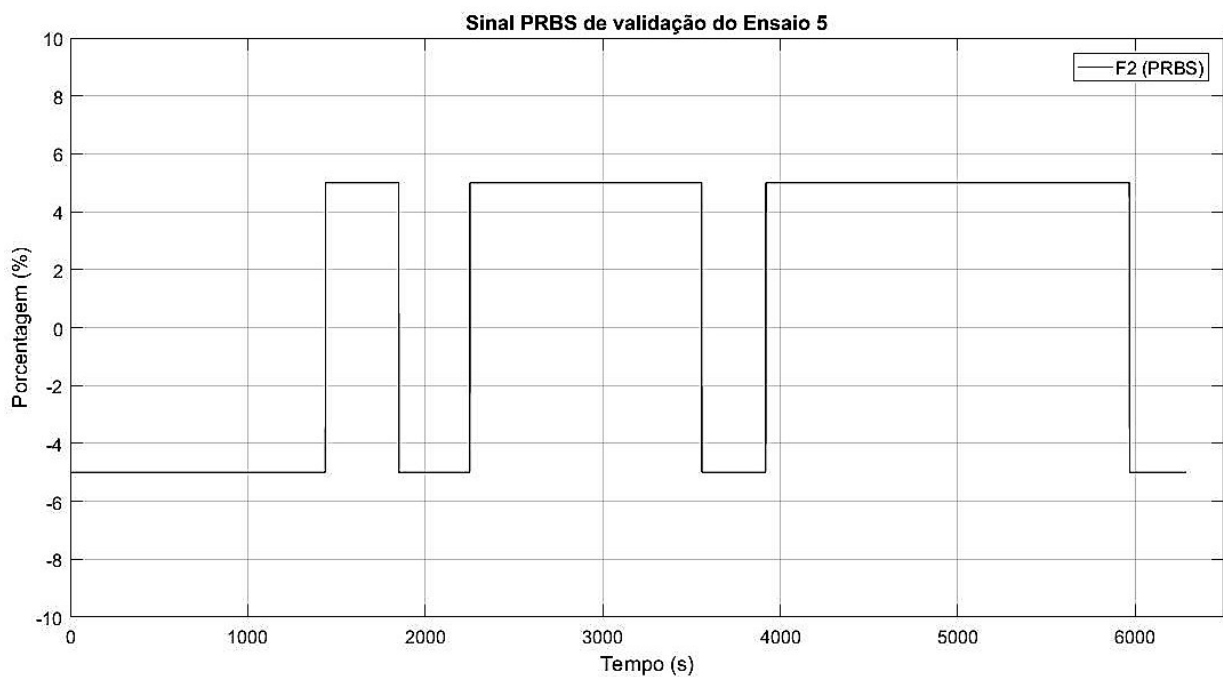


Figura 3.14: Entrada para validação do Ensaio 5

A aderência do nível h_1 estimado foi de 90,92%, enquanto que a do nível h_2 foi de 91,6%. O FPE calculado pelo Matlab para o Modelo 2 da Figura 3.13 foi $FPE =$

0,1287, e o MSE foi $MSE = 1,094$.

Para entender como são calculados no Matlab esses parâmetros da métrica de qualidade do modelo, recomenda-se acessar o próprio site de referência sobre o assunto oferecido pela Mathworks:

<https://www.mathworks.com/help/ident/ug/model-quality-metrics.html>.

3.4 Comparação dos Modelos Identificados

Os Ensaio 3, 4 e 5 deram origem aos Modelos 1, 2 e 3, respectivamente. Cada Modelo serve bem a uma configuração de operação da planta piloto:

- **Modelo 1:** Bombas **B1** e **B2** ligadas;
- **Modelo 2:** Bomba **B1** ligada e bomba **B2** desligada;
- **Modelo 3:** Bomba **B1** desligada e bomba **B2** ligada;

Para facilitar ainda mais a visualização dessas configurações, foi criada a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Configurações dos ensaios, relação com as bombas **B1** e **B2**, e modelo gerado

Ensaio	Bomba B1	Bomba B2	Modelo gerado
Ensaio 3	Ligada	Desligada	Modelo 1
Ensaio 4	Ligada	Desligada	Modelo 2
Ensaio 5	Desligada	Ligada	Modelo 3

Como uma medida de avaliação entre os modelos, cada um deles foi submetido a uma comparação com os dados de validação dos outros ensaios que não os geraram. Esse procedimento serve para examinar se é possível extrapolar o modelo de uma configuração da planta piloto para outra. Os resultados desses testes são evidenciados na Tabela 3.2 e nas Figuras 3.15, 3.16 e 3.17.

Tabela 3.2: Resultados de todos os modelos com todos os ensaios

Modelo	Aderência ao Ensaio 3	Aderência ao Ensaio 4	Aderência ao Ensaio 5
Modelo 1	81,24% & 76,46%	12,06% & -5,445%	40,25% & 39,31%
Modelo 2	-397,2% & -446%	82,56% & 86,64%	-1137% & -1167%
Modelo 3	-12% & -9,244%	0,487% & -1,998%	90,92% & 91,6%

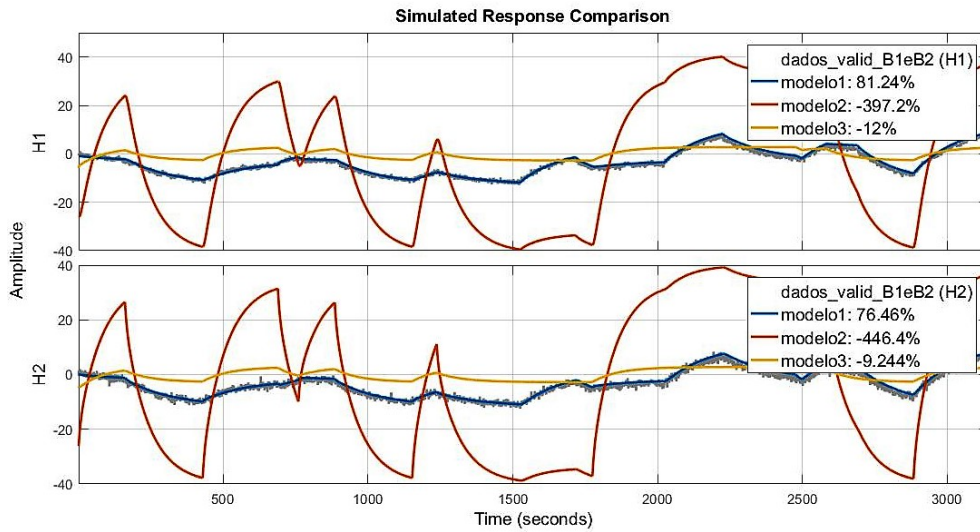


Figura 3.15: Modelos comparados com os dados de validação do Ensaio 3

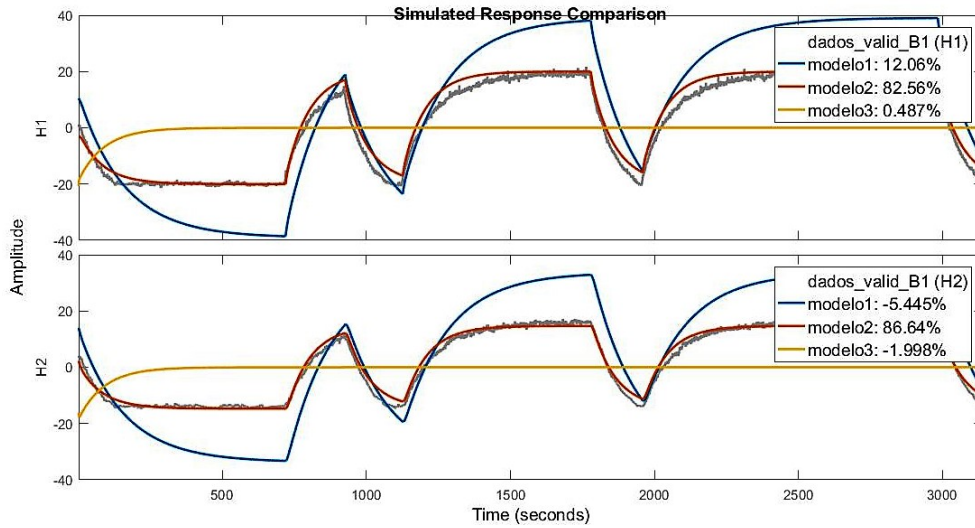


Figura 3.16: Modelos comparados com os dados de validação do Ensaio 4

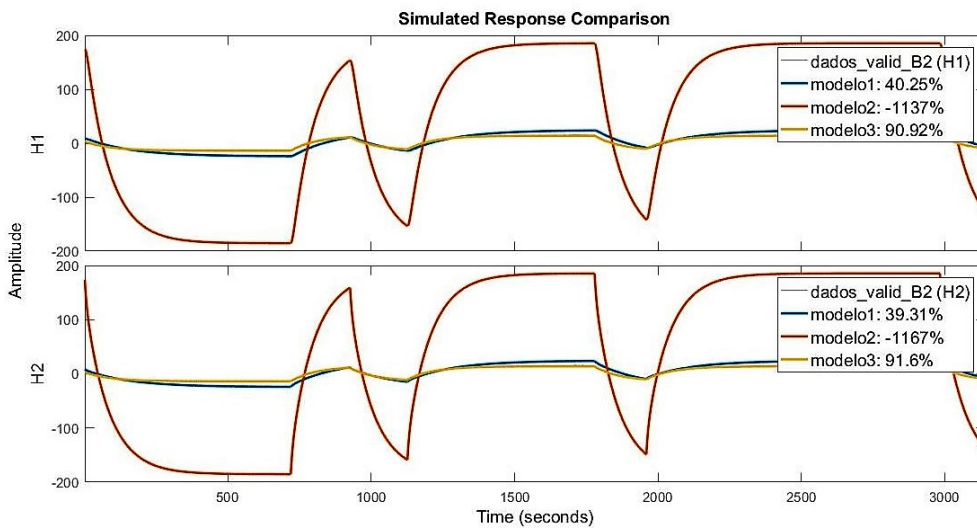


Figura 3.17: Modelos comparados com os dados de validação do Ensaio 5

A partir das Figuras 3.15, 3.16 e 3.17, e da Tabela 3.2, verifica-se que para dados diferentes daqueles provenientes dos próprios ensaios que os geraram, os modelos não apresentam boa aderência. Com exceção do Modelo 1, que aderiu parcialmente aos dados de validação do Ensaio 5. Essa análise significa que os modelos obtidos funcionam bem apenas para suas configurações de origem. Um trabalho futuro poderia tentar sobrepor as características do Modelo 2 e do Modelo 3 para criar um novo modelo que se adequasse à situação mais geral em que as duas bombas do sistema estão ligadas, ou seja, o Ensaio 3. Desta forma, seria possível comparar essa composição de resultados das contribuições individuais das entradas com o resultado obtido das entradas funcionando em conjunto.

A teoria de identificação [10] propõe que um modelo seja identificado com 70% dos dados, e validado com os 30% restantes. Essa medida é tomada para que não haja uma “superadaptação”, *overfitting*, do modelo aos dados, ou seja, para que o modelo seja capaz de ter um comportamento genérico o suficiente para se adequar a qualquer situação, não apenas a uma específica. Porém, isso funciona apenas para o mesmo conjunto de dados levantado; e numa mesma configuração do sistema. Os resultados congregados na Tabela 3.2 foram uma tentativa de extrapolar esse resultado de identificação para outros conjuntos de dados e outras configurações. No entanto, os resultados indicaram que esse procedimento não tem eficiência.

Foi preparado um novo diagrama no Simulink, desta vez no espaço de estados formatado pela Equação 3.19, que é mostrado nas Figuras 3.18 e 3.19. Ou seja, a Figura 3.19 tem as matrizes A , B , C e D descritas na Equação 3.19.

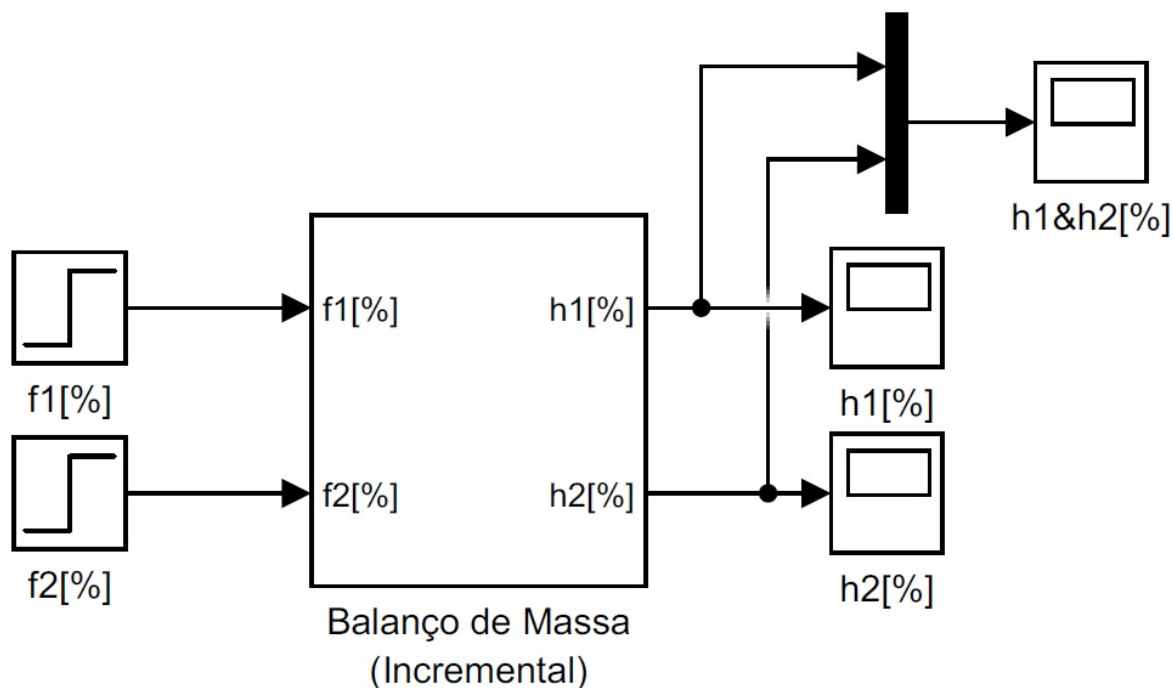


Figura 3.18: Diagrama de blocos do Modelo 1, caixa-cinza linear, no Simulink

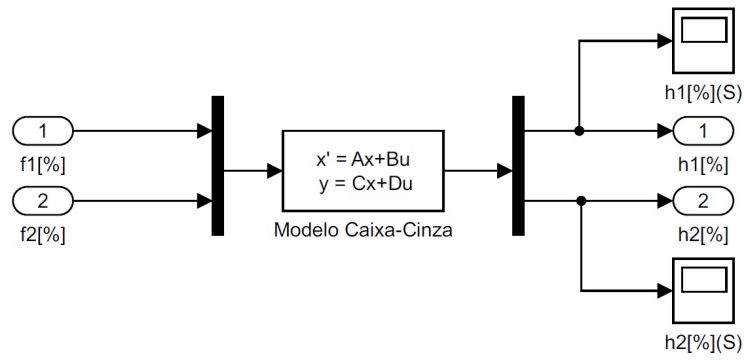


Figura 3.19: Diagrama das equações lineares originadas do balanço de massa, no Simulink
 Ao sistema das Figuras 3.18 e 3.19, foi fornecido um degrau unitário. Os resultados foram os gráficos das Figuras 3.20 e 3.21.

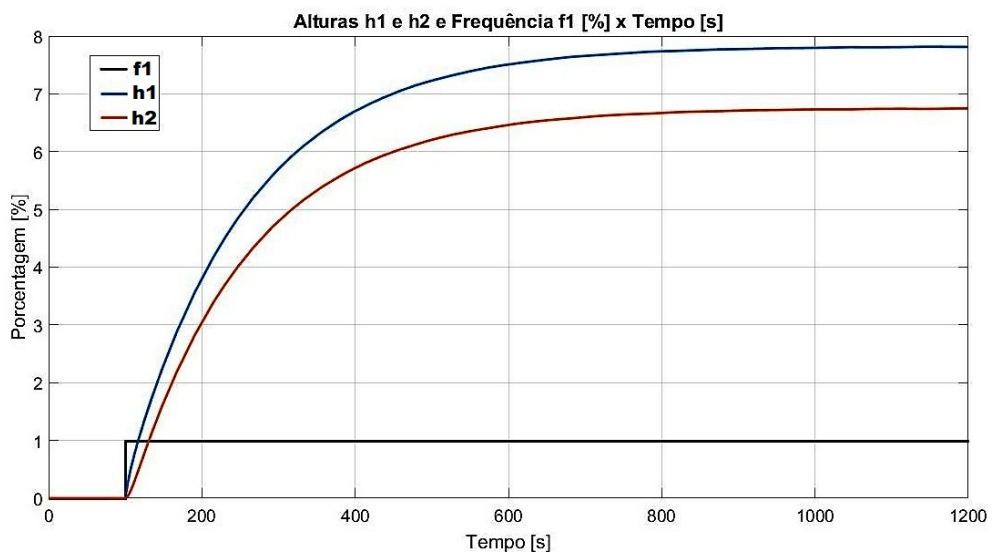


Figura 3.20: Resposta do nível h_1 ao degrau na frequência f_1 , no Simulink

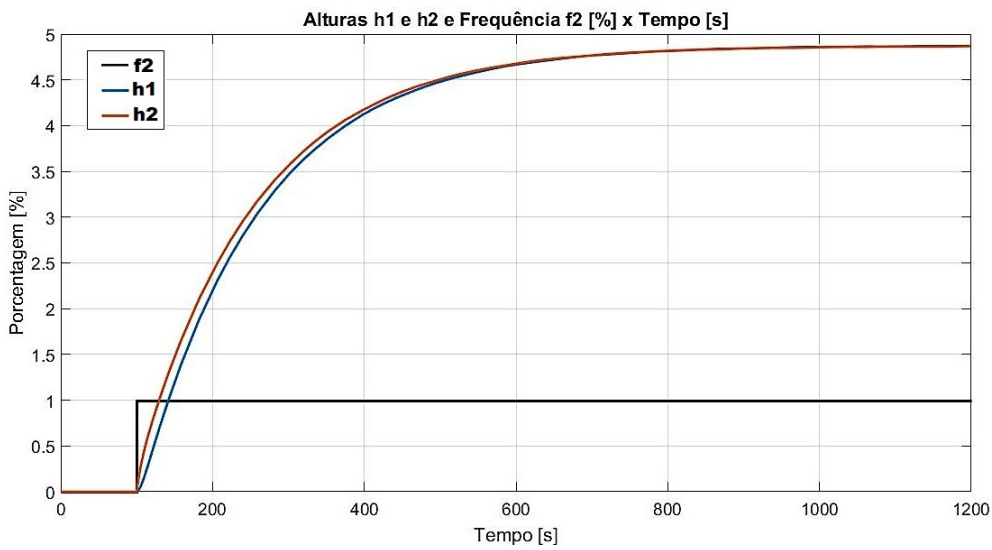


Figura 3.21: Resposta do nível h_2 ao degrau na frequência f_2 , no Simulink

As Figuras 3.20 e 3.21 mostram gráficos de resposta dos níveis de líquido a uma entrada de frequência de inversão de frequência. A dinâmica desses dois gráficos apresenta características de primeira ordem ou de segunda ordem muito amortecida. Um elevado tempo de subida, uma constante de tempo grande. Para comparar o comportamento simplificado linear ao não linear foi feita a identificação, para que os parâmetros se adequassem melhor à aplicação real do sistema. Essa adequação pode ser aferida como a aderência do modelo aos dados de validação, como foi feito na análise dos Ensaios 3, 4 e 5. Analisando a Tabela 3.2, o Modelo que mais se aderiu aos dados de validação de seu ensaio foi o Modelo 3 ao Ensaio 5, seguido do Modelo 2 ao Ensaio 4 e por último do Modelo 1 ao Ensaio 3. A justificativa para isso supõe-se que seja o fato de a configuração do Ensaio 3 ser mais complexa que as demais. Seria interessante repetir o ensaio mais vezes, talvez aumentando o tempo que o sinal PRBS se mantém em um valor antes de alterá-lo. Pode ser que a dinâmica com duas bombas ligadas seja mais lenta que apenas com uma delas funcionando.

Verifica-se nas Figuras 3.20 e 3.21, provenientes da simulação computacional do Modelo 1 no Simulink, que o comportamento do modelo caixa-cinza obtido respeita o esperado. Ao comparar a dinâmica simulada dessas figuras com a real, nas Figuras 3.2 e 3.3, é possível verificar tanto o comportamento de *buffer* [12] do ensaio com apenas a bomba 1 ligada, quanto o comportamento em que as alturas atingem o mesmo estado estacionário com apenas a bomba 2 ligada.

Todos os dados obtidos experimentalmente foram provenientes de um modelo em formato de diagrama de blocos no Simulink, que comunica os componentes da planta ao computador central. Este diagrama é exibido na Figura 3.22. Os blocos `OPC Read`, `OPC Write` e `OPC Configuration` são responsáveis pela comunicação protocolar entre o CLP e o *software* Automation Studio, que gerencia todo os diagramas de engenharia que regem todo o diagrama Ladder do sistema, ou seja, o seu comportamento lógico bruto.

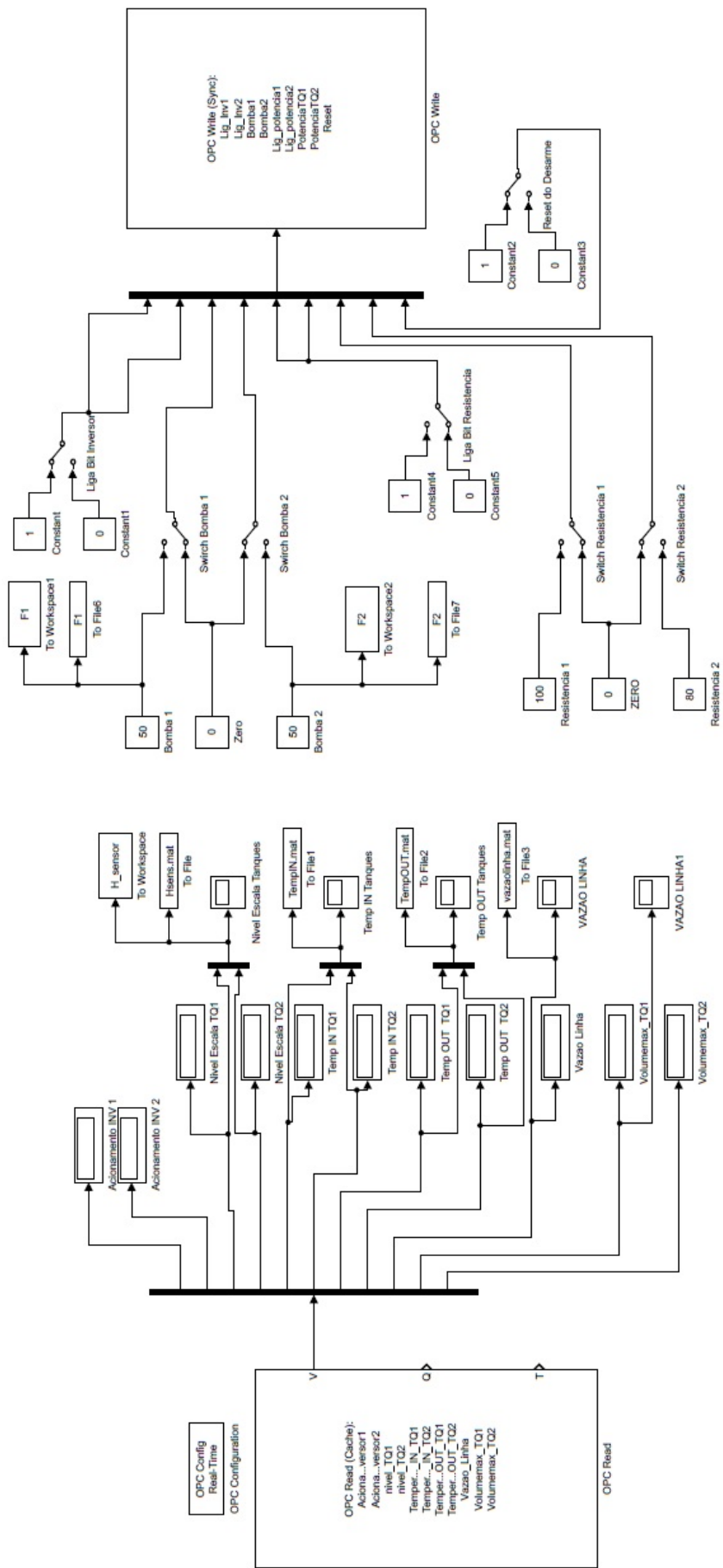


Figura 3.22: Modelo no Simulink utilizado na coleta de dados da planta piloto

3.5 Modelo Caixa-Cinza Não Linear Utilizando `nlgreyest()`

Além de obter o modelo caixa-cinza linear na identificação do sistema, houve também a tentativa de chegar a um modelo caixa-cinza não linear, por meio da utilização da função `nlgreyest()` do Matlab. Há algumas considerações sobre essa função: para trabalhar com ela, deve ser escolhido o método de busca dos parâmetros, o que se não for feito de forma apropriada, pode piorar em vez de aprimorar os resultados. Computacionalmente, a função de busca de um modelo caixa-cinza não linear é muito mais cara que a linear. Enquanto que a linear demora segundos para fornecer um modelo a partir dos dados, a não linear pode demorar horas. Um exemplo de utilização da função `nlgreyest()` com os mesmos dados e a mesma configuração do Ensaio 3 (ver Figura 3.7) é exemplificada na Figura 3.23.

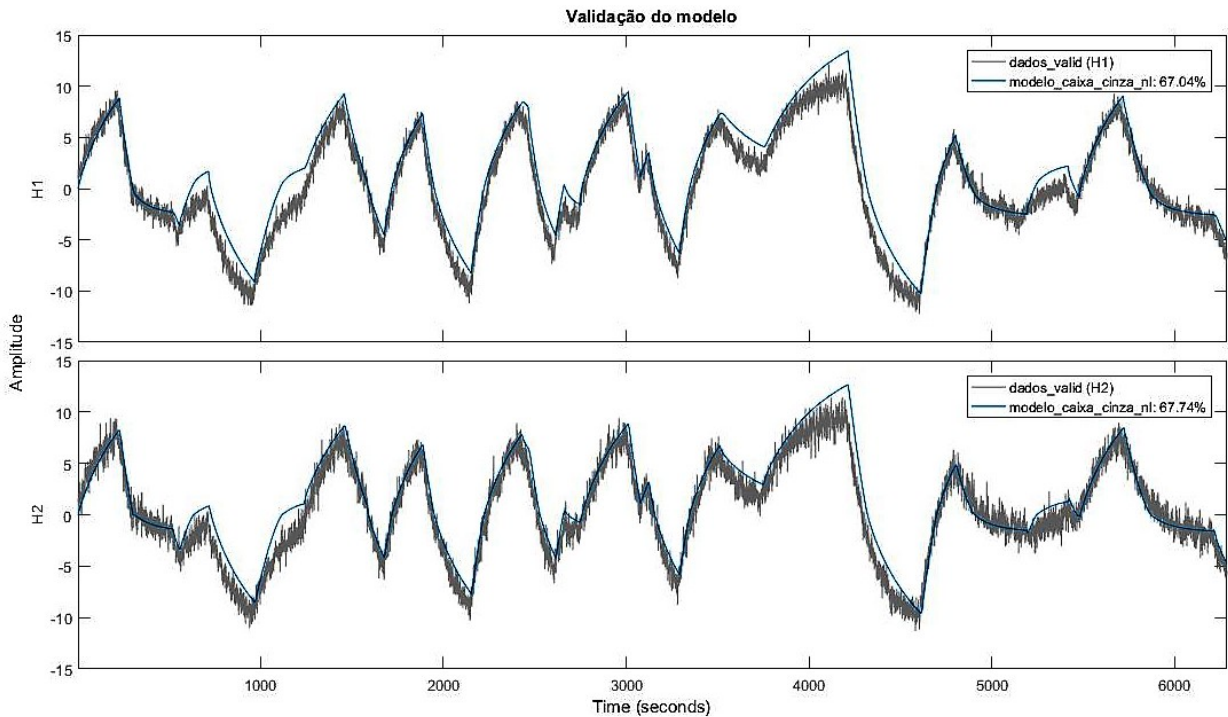


Figura 3.23: Resultado da identificação utilizando a função `nlgreyest()` no Matlab

No Anexo II, observa-se como a forma do sistema não linear é informada à função `nlgreyest()` para a identificação caixa-cinza. O modelo a ser calculado pela função tem a seguinte estrutura:

Espaço de Estados - **Estrutura do Modelo Não Linear:**

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} k_1 f_1 - k_3 \sqrt{h_1 - h_2} \\ k_2 f_2 + k_3 \sqrt{h_1 - h_2} - k_4 \sqrt{h_2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.20)$$

O Matlab fornece os valores dos parâmetros com alto grau de precisão após seus procedimentos. São eles:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 0.103911 \pm 0.000340927; \\
 k_2 &= 0.0531765 \pm 0.000209764; \\
 k_3 &= 0.104125 \pm 0.000548468; \\
 k_4 &= 0.0387696 \pm 0.000143141.
 \end{aligned}
 \tag{3.21}$$

Substituindo os resultados de 3.21 na Equação 3.20, caracteriza-se o modelo não linear caixa-cinza identificado:

Espaço de Estados - **Modelo Não Linear Identificado:**

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0,104f_1 - 0,104\sqrt{h_1 - h_2} \\ 0,053f_2 + 0,104\sqrt{h_1 - h_2} - 0,04\sqrt{h_2} \end{bmatrix}, \\
 \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

A aderência do modelo aos dados experimentais foi de 67,04% no nível h_1 e 67,74% no nível h_2 . Os outros critérios de avaliação do modelo fornecidos pelo Matlab foram: $FPE = 1,772$, $MSE = 4,75$. O valor de 4,75 no erro quadrático médio é superior aos modelos lineares, que tem erro por volta de 1. No entanto, pouco tempo foi investido na investigação do uso dessa função de identificação não linear, que é mais poderosa. Em trabalhos posteriores, esse é um ponto de partida muito bom, que possibilita lidar com a planta em seu comportamento não linear, mais próximo do real. O método de busca utilizado na função `nlgreyest()` foi o `lsqnonlin`, que é um solucionador não linear de problemas de mínimos quadrados, com referência no link:

<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/lsqnonlin.html>

Capítulo 4

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho de graduação abordou o tema de modelagem e identificação de uma planta piloto levando em consideração as leis que regem seu funcionamento. A estrutura da planta estudada conta com dois tanques de mistura interconectados, dos quais se analisou o balanço de massa e o balanço de energia. Os experimentos práticos feitos foram direcionados apenas para o balanço de massa, mas o método pode ser aplicado à parte térmica em trabalhos futuros. O objetivo do projeto era investigar e compreender o comportamento da planta piloto e do processo que a envolve, o que foi alcançado por meio da aplicação da teoria de identificação de sistemas dinâmicos, e a consequente validação.

O trabalho levou dois semestres, sendo que no primeiro foi construído um modelo de equações baseadas em Noções Primitivas (*First Principles*), que parte dos axiomas dos fundamentos físicos envolvidos no processo e chega nas equações que o modelam. Tratar o sistema e tentar identificar seus parâmetros a partir dessas equações fenomenológicas seria encontrar o que é chamado de modelo caixa-branca [10]. No segundo semestre, a proposta inicial era identificar o modelo da planta, para então aplicar uma técnica de controle simples e automatizá-la. No entanto, a parte de controle ficou como um trabalho futuro a ser desenvolvido. A abordagem tomada no segundo semestre levou em consideração a modelagem fenomenológica construída, sendo que as equações foram simplificadas e linearizadas para realizar o procedimento de identificação. Assim, as equações diferenciais foram moldadas de forma a tratar do sistema como um modelo caixa-cinza [11]. Essa escolha facilitou as análises dos resultados dos ensaios e possibilitou que bons modelos fossem obtidos computacionalmente. Toda a investigação do comportamento do sistema e dos dados gerados foi feita com o suporte das ferramentas Matlab e Simulink, em comunicação com os componentes da planta piloto e do CLP.

Como propósito secundário deste relatório, desejou-se instruir e direcionar os próximos alunos que venham a lidar com a planta piloto em questão, localizada no Laboratório de Controle de Processos Industriais da UnB. Vários pontos de interesse pode ser mencionados ao término deste trabalho, principalmente limitações ao se lançar à empreitada de trabalhar

com um sistema real, algumas delas: a impossibilidade de tratar as variáveis com seus valores absolutos, nas unidades de engenharia, o que torna as análises matemáticas e físicas menos intuitivas; a impossibilidade de se tratar algumas variáveis em seu formato desejado, como as vazões que foram substituídas por frequências de inversão, o que leva a alterações das equações dos modelos; os ruídos presentes nos dados, que reduzem a eficácia com que são tratados; o fato de os tanques de mistura serem fechados, o que impossibilita que a progressão do nível de líquido seja acompanhada visualmente e o comportamento do processo seja visualizado com clareza; as zonas mortas de operação dos inversores de frequência, que reduzem significativamente a faixa de operação das bombas que enviam líquido aos tanques; as limitações físicas do processo em geral, como o nível máximo de líquido; as falhas de comunicação entre componentes e computador, etc.

Todas essas limitações fazem parte da realidade de trabalhar com um sistema concreto, e não teórico. Na parte inicial do relatório, foi feita uma alegação de que uma planta piloto é aquela que “de forma pedagógica e ao mesmo tempo verídica possibilita testar as hipóteses formuladas e aprimorá-las em um Modelo eficiente”. A conclusão que se chega é que em uma indústria, por exemplo, onde haverá uma planta com comportamento semelhante ao da aqui analisada, as dificuldades serão praticamente as mesmas, a menos de um fator de escala, pois cada componente terá dimensões muito maiores. Então, a proposta de conhecer como funciona um sistema real ou, pelo menos, o que se espera encontrar de situações-problema ao lidar com um, foi alcançada.

Uma conclusão importante, ao analisar o progresso e o resultado do trabalho, é que há uma grande importância em saber escolher os ensaios certos e adequados para identificar e validar um sistema ou um processo. Grande parte do tempo deste trabalho de graduação foi dedicada à realização de experimentos segundo o Ensaio 2 descrito na Seção 3.3. Todavia, esses experimentos não serviram para a identificação propriamente dita. Algumas informações preciosas foram sintetizadas dele, como: o inversor de frequência, e por consequência a bomba hidráulica, possui faixas de operação em que não funciona, faixas em que não trabalha bem, faixas em que seu comportamento é normal, e faixas em que ultrapassam as limitações do sistema e do processo. Os ganhos em cada faixa de operação, das saídas em reação às entradas, não seguiam um padrão bem definido, e não se ajustavam bem a qualquer interpolação escolhida. Ao sair de um ponto de operação para outro, aumentando unitariamente o degrau de entrada, o ganho hora aumentava e hora diminuía. Ao refletir sobre esses resultados, supôs-se que os inversores de frequência não funcionavam bem para aumentos pequenos na amplitude de seu sinal de entrada; que talvez houvesse o fenômeno de “*backlash*” ou no inversor ou na bomba que ele controla, para esses pequenos degraus de entrada.

Ao efetuar o Ensaio 1, verificou-se que a planta piloto também não funcionava bem com degraus de grande amplitude ou excursão, pelo menos não para o processo de identificação e validação, pois há muitas não linearidades que podem ser listadas. Com esse ensaio, depreendeu-se que para cada valor de entrada, o sistema chega a um ponto de operação em

estado estacionário. Isso inclusive serviu para possibilitar que os dados dos Ensaio 3, 4 e 5 fossem centralizados em torno dos dados pontos de operação. De fato, supõe-se que a planta piloto irá funcionar saindo de um ponto de operação e indo para outro, e não partindo do zero, como se fez no Ensaio 1. Essa parte inicial do experimento, que vai desde o tanque estar vazio até o nível atingir seu regime estacionário devido às vazões de saída, sempre será considerada como um comportamento transitório. Em outras palavras, o tempo entre ligar a planta e ela assumir os valores em que funcionará realmente é desprezado, não é de interesse nem do ponto de vista de identificação, nem do ponto de vista de controle.

Ao estudar mais profundamente o tipo de ensaio que é escolhido em aplicações parecidas com a deste trabalho [11], [10], [4] e [6], é que foi escolhido o ensaio com entrada em pequenas variações do estilo PRBS. Este sinal é descrito na Seção 3.3, seção em que a identificação segundo um modelo caixa-cinza linear foi feita, utilizando a função `greyest()` do *software* Matlab. Os Modelos lineares 1, 2 e 3 obtidos tiveram aderência boa aos seus ensaios, superior a 80%; mas em trabalhos futuros podem ser considerados modelos não lineares mais sofisticados, ou com outros métodos de identificação.

A tentativa de modelar o sistema por um modelo caixa-cinza não linear foi apenas iniciada neste trabalho, a partir do estudo da função `nlgreyest()`. Com mais alguma insistência em escolher as opções corretas no uso da função, acredita-se que resultados ainda melhores e mais realistas que o caixa-cinza linear poderiam ter sido alcançados. Esse é mais um requisito a ser preenchido em trabalhos posteriores a este. Além disso, deve-se cogitar a possibilidade de modelar o sistema como um modelo caixa-preta, ou utilizar outro método mais refinado, mas também é algo a se testar posteriormente. E pode ser que o sinal PRBS de entrada com apenas dois níveis não seja a melhor opção para esses ensaios, o que é uma nova configuração a se pensar para conhecer melhor a planta em outros trabalhos. Além disso, pode ser testado um tipo de sinal PRBS que permaneça mais tempo em cada nível, para deixar que as respostas se assentem melhor antes de mudarem.

Sob aspectos mais práticos da planta piloto, ficou como uma pendência colocar para funcionar a parte térmica modelada contemplando o balanço de energia do sistema. Além disso, em vez de apenas identificar os parâmetros gerais do processo como um todo, poderia ser feita uma identificação das curvas de cada componente, como a bomba hidráulica, o inversor de frequência, as resistências assim que a parte térmica estiver funcional, etc. Identificar o processo completo foi uma estratégia adotada, e valeria a pena investigar outras escolhas e compará-las.

Também devem ser testadas novas configurações da planta piloto em si, como abrir a válvula de despejo de líquido que fica abaixo do Tanque 1. Na configuração apresentada, o Tanque 1 serviu de *buffer* [12], de acumulador de líquido para o Tanque 2, que e deseja controlar. Essa característica pode ser verificada nas Figuras 3.1 e 3.2, em que apenas a bomba **B1** estava acionada, e o nível de líquido h_1 ficou maior que h_2 . No entanto, essa decisão de fechar a válvula de escoamento do Tanque 1 reduz consideravelmente a faixa de

operação do processo, pois diminui a vazão de saída possível, fazendo com que os níveis de líquido saturem muito mais rápido. Uma sugestão para trabalhos futuros seria deixar todas as válvulas abertas.

Com essas conclusões, espera-se que o trabalho realizado na planta piloto do Laboratório de Controle de Processos Industriais da UnB possa ser continuado, cada vez gerando mais aprendizado para os alunos responsáveis, e também proporcionando mais desenvolvimento científico e humano para a sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. *Principles and Practice of Automatic Process Control*. 2nd. ed. : John Wiley & Sons, 1997.
- [2] CHEN, L. et al. A process-level water conservation and pollution control performance evaluation tool of cleaner production technology in textile industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 1137 – 1143, 2017. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616320546>>.
- [3] LIM, S. A. H.; ANTONY, J. Statistical process control readiness in the food industry: Development of a self-assessment tool. *Trends in Food Science and Technology*, v. 58, p. 133 – 139, 2016. ISSN 0924-2244. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224415301527>>.
- [4] PRADA, C. de et al. A strategy for predictive control of a mixed continuous batch process. *Journal of Process Control* 19, p. 123–137, 2009.
- [5] DOWNS, J.; VOGEL, E. A plant-wide industrial process control problem. *Computers and Chemical Engineering*, v. 17, n. 3, p. 245 – 255, 1993. ISSN 0098-1354. Industrial challenge problems in process control. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/009813549380018I>>.
- [6] THORNHILL, N. F.; PATWARDHAN, S. C.; SHAH, S. L. A continuous stirred tank heater simulation model with applications. *Journal of Process Control* 18, p. 347–360, 2008.
- [7] GORP, L. V. *Antoine Lavoisier. Founder of Modern Chemistry*. : Shell Education;Teacher Created Materials, 2008. (Physical Science (Science Readers)).
- [8] BERNOULLI, D. *Hydrodynamica*. : Sumptibus Johannis Reinholdi Dulseckeri, 1738.
- [9] MATHWORKS. *System Identification Toolbox - Matlab*. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/sysid.html>>.
- [10] AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas : técnicas lineares e não lineares : teoria e aplicação*. 4a.. ed. : UFMG, 2014.

- [11] CORRÊA, M. V.; AGUIRRE, L. A. Identificação não-linear caixa-cinza: uma revisão e novos resultados. *Sba: Controle e Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, scielo, v. 15, p. 109 – 126, 06 2004. ISSN 0103-1759.
- [12] FAANES, A.; SKOGESTAD, S. Buffer tank design for acceptable control performance. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 42(10), p. 2198–2208, 2003.
- [13] FELDER RONALD W. ROUSSEAU, L. G. B. R. M. *Elementary Principles of Chemical Processes*. 4th. ed. Wiley, 2015. ISBN 978-0-470-61629-1. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=8591DD69DCB24DDD18762A33BC53056B>>.
- [14] KERN, D. *Process Heat Transfer*. : McGraw-Hill, 1965.
- [15] ARPACI, V. S. *Conduction Heat Transfer*. : Addison-Wesley.
- [16] BENTLEY, J. P. *Principles of Measurement Systems*. 4th. ed. : Pearson Education Limited, 2005.
- [17] SANDLER, S. I. *Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics*. 4th. ed. John Wiley, 2006. ISBN 0471661813,0471661740,9780471661740,9780471661818. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=9FDE806213CD10D73535F621A0604B46>>.
- [18] JR., G. B. T. *Cálculo*. 11. ed. : Pearson Education, 2009. 122 p.

ANEXOS

I. IDENTIFICAÇÃO LINEAR NO MATLAB UTILIZANDO A FUNÇÃO GREYEST()

O conjunto de dados para o ensaio, 'PRBS_B1eB2_35a37.mat', é fornecido no CD entregue com a versão final deste relatório.

Script que realiza a identificação linear utilizando a função `greyest()`:

```
1 %% Carregamento dos dados
2 load('PRBS_B1eB2_35a37.mat')
3
4 %% Tratamento inicial dos dados
5 H1H2 = H_sensor.Data;
6 H1s = H1H2(:,1);
7 H2s = H1H2(:,2);
8 F1s = F1.Data;
9 F2s = F2.Data;
10
11 %% Plotagem dos dados
12 % figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
13 % plot(H1s, 'b');
14 % hold on;
15 % plot(H2s, 'g');
16 % hold on;
17 % plot(F1s, 'k');
18 % hold on;
19 % plot(F2s, 'r');
20 % grid on;
21 % title('Sinal PRBS e Resposta ao PRBS x Tempo');
22 % xlabel('Tempo (s)');
23 % ylabel('Porcentagem (%)');
24 % legend({'H1', 'H2', 'F1 (PRBS)', 'F2 (PRBS)'}, 'FontSize',12);
25
26 %% Remocao do transitorio dos dados
27 H1s = H1s((1500:length(H1s)),1);
28 H2s = H2s((1500:length(H2s)),1);
29 F1s = F1s((1500:length(F1s)),1);
30 F1s = F1s(1:length(H1s),1);
31 F2s = F2s((1500:length(F2s)),1);
32 F2s = F2s(1:length(H2s),1);
33
34 %% Divisao dos dados entre identificacao e validacao
35 fim = 41916;
36 % fim = 20958;
37 inicio_validacao = 29341; % 70% dos dados
38 % inicio_validacao = 20958; % 50% dos dados
39 H1si = H1s(1:inicio_validacao);
40 H1sv = H1s(inicio_validacao+1:fim);
41 H2si = H2s(1:inicio_validacao);
42 H2sv = H2s(inicio_validacao+1:fim);
43 F1si = F1s(1:inicio_validacao);
44 F1sv = F1s(inicio_validacao+1:fim);
45 F2si = F2s(1:inicio_validacao);
46 F2sv = F2s(inicio_validacao+1:fim);
47
```

```

48 %% Normalizacao em torno do zero dos dados
49 % h1e = 71.4835; % Nivel H1 estacionario (obtido experimentalmente com 'median()')
50 % h2e = 64.6278; % Nivel H2 estacionario (obtido experimentalmente com 'median()')
51 h1e = 71.4692; % Nivel H1 estacionario (obtido experimentalmente com 'mean()')
52 h2e = 64.6034; % Nivel H2 estacionario (obtido experimentalmente com 'mean()')
53
54 % Normalizacao dos dados de identificacao
55 H1si = H1si - h1e;
56 H2si = H2si - h2e;
57 F1si = F1si - 36;
58 F2si = F2si - 36;
59
60 % Normalizacao dos dados de validacao
61 H1sv = H1sv - h1e;
62 H2sv = H2sv - h2e;
63 F1sv = F1sv - 36;
64 F2sv = F2sv - 36;
65
66 %% Criacao da estrutura de dados completa
67 % DATA
68 resposta = iddata([H1s, H2s],[F1s,F2s],0.5);
69 resposta.InputName = {'F1','F2'};
70 resposta.OutputName = {'H1','H2'};
71
72 %% Criacao da estrutura de dados de identificacao
73 % DATA
74 dados_ident = iddata([H1si, H2si],[F1si,F2si],0.5);
75 dados_ident.InputName = {'F1','F2'};
76 dados_ident.OutputName = {'H1','H2'};
77
78 %% Criacao da estrutura de dados de validacao
79 % DATA
80 dados_valid = iddata([H1sv, H2sv],[F1sv,F2sv],0.5);
81 dados_valid.InputName = {'F1','F2'};
82 dados_valid.OutputName = {'H1','H2'};
83
84 %% Plotagem da estrutura de dados completa
85 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
86 plot(resposta);
87
88 %% Obtencao do sistema inicial com 'idgrey()'
89 % 'odefun'
90 funcao_modelo = 'modelo2tanques';
91
92 % 'parameters'
93 % Abordagem com valores iniciais unitarios nas constantes
94 k1 = 1;
95 k2 = 1;
96 k3 = 1;
97 alpha = 1;
98 k4 = 1;
99 beta = 1;
100
101 % Abordagem com palpites iniciais nas constantes
102 % k1 = 2.6;
103 % k2 = 2.6;
104 % k3 = 3.5;
105 % alpha = k3 / (2 * sqrt(h1ei - h2ei));
106 % k4 = 3.3;
107 % beta = k4 / (2 * sqrt(h2ei));

```

```

108
109 % 'Ts'
110 % Ts = 0.5;
111 Ts = 0;
112
113 parametros_modelo = {'alpha', alpha; 'beta', beta; 'k1', k1; 'k2', k2};
114
115 % 'fcn_type'
116 % tipo_funcao = 'c';
117 tipo_funcao = 'cd';
118 % tipo_funcao = 'd';
119
120 % 'optional_args'
121 % opcional = {h1e, h2e}; % Ponto de operacao
122 opcional = {};
123
124 % 'SYSINIT' = idgrey(odefun, parameters, fcn_type, optional_args, Ts)
125 estrutura_modelo = idgrey(funcao_modelo, parametros_modelo, tipo_funcao, opcional, Ts);
126
127 %% Obtencao do modelo caixa-cinza com 'greyest()'
128 % SYS = greyest(DATA, SYSINIT)
129 opcoes_greyest = greyestOptions;
130 opcoes_greyest.InitialState = 'backcast';
131 opcoes_greyest.InputOffset = [0;0];
132 opcoes_greyest.OutputOffset = [0;0];
133
134 % Opcoes adicionais de melhoria da resposta
135 opcoes_greyest.DisturbanceModel = 'estimate';
136 opcoes_greyest.EnforceStability = true;
137
138 modelo_caixa_cinza = greyest(dados_ident, estrutura_modelo, opcoes_greyest)
139
140 %% Validacao do modelo
141 figure('units', 'normalized', 'outerposition', [0 0 1 1]);
142 compare(dados_valid, modelo_caixa_cinza);

```

Script que descreve a estrutura caixa-cinza linear do modelo a se identificar, 'modelo2tanques.m':

```
1 function [A, B, C, D, K] = modelo2tanques(alpha, beta, k1, k2, Ts)
2 %% Balanco de massa: processo com dois tanques
3
4 %% Equacoes
5 % dh1/dt = - alpha * h1 + alpha * h2 + k1 * f1;
6 % dh2/dt = alpha * h1 - (alpha + beta) * h2 + k2 * f2;
7
8 %% Modelo
9 A = [-alpha, alpha; alpha, -alpha-beta];
10 B = [k1, 0; 0, k2];
11 C = [1, 0; 0, 1];
12 D = [0, 0; 0, 0];
13
14 K = zeros(2);
15 %% X0 = [aux(1); aux(2)];
16 % X0 = [0; 0];
17 if Ts>0 % Para discretizar o modelo quando Ts>0
18     s = expm([A B]*Ts; zeros(2,4));
19     A = s(1:2,1:2);
20     B = s(1:2,3:4);
21 end
```

II. IDENTIFICAÇÃO NÃO LINEAR NO MATLAB UTILIZANDO A FUNÇÃO NLGREYEST()

O conjunto de dados para o ensaio, 'PRBS_B1eB2_35a37.mat', é fornecido no CD entregue com a versão final deste relatório.

Script que realiza a identificação não linear utilizando a função `nlgreyest()`:

```
1 %% Carregamento dos dados
2 load('PRBS_B1eB2_35a37.mat')
3
4 %% Tratamento inicial dos dados
5 H1H2 = H_sensor.Data;
6 H1s = H1H2(:,1);
7 H2s = H1H2(:,2);
8 F1s = F1.Data;
9 F2s = F2.Data;
10
11 %% Plotagem dos dados
12 % figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
13 % plot(H1s, 'b');
14 % hold on;
15 % plot(H2s, 'g');
16 % hold on;
17 % plot(F1s, 'k');
18 % hold on;
19 % plot(F2s, 'r');
20 % grid on;
21 % title('Sinal PRBS e Resposta ao PRBS x Tempo');
22 % xlabel('Tempo (s)');
23 % ylabel('Porcentagem (%)');
24 % legend({'H1', 'H2', 'F1 (PRBS)', 'F2 (PRBS)'}, 'FontSize',12);
25
26 %% Remocao do transitorio dos dados
27 H1s = H1s((1500:length(H1s)),1);
28 H2s = H2s((1500:length(H2s)),1);
29 F1s = F1s((1500:length(F1s)),1);
30 F1s = F1s(1:length(H1s),1);
31 F2s = F2s((1500:length(F2s)),1);
32 F2s = F2s(1:length(H2s),1);
33
34 %% Divisao dos dados entre identificacao e validacao
35 fim = 41916;
36 % fim = 20958;
37 inicio_validacao = 29341; % 70% dos dados
38 % inicio_validacao = 20958; % 50% dos dados
39 H1si = H1s(1:inicio_validacao);
40 H1sv = H1s(inicio_validacao+1:fim);
41 H2si = H2s(1:inicio_validacao);
42 H2sv = H2s(inicio_validacao+1:fim);
43 F1si = F1s(1:inicio_validacao);
44 F1sv = F1s(inicio_validacao+1:fim);
45 F2si = F2s(1:inicio_validacao);
46 F2sv = F2s(inicio_validacao+1:fim);
47
```

```

48 %% Normalizacao em torno do zero dos dados
49 % h1e = 71.4835; % Nivel H1 estacionario (obtido experimentalmente com 'median()')
50 % h2e = 64.6278; % Nivel H2 estacionario (obtido experimentalmente com 'median()')
51 h1e = 71.4692; % Nivel H1 estacionario (obtido experimentalmente com 'mean()')
52 h2e = 64.6034; % Nivel H2 estacionario (obtido experimentalmente com 'mean()')
53
54 % Normalizacao dos dados de identificacao
55 H1si = H1si - h1e;
56 H2si = H2si - h2e;
57 F1si = F1si - 36;
58 F2si = F2si - 36;
59
60 % Normalizacao dos dados de validacao
61 H1sv = H1sv - h1e;
62 H2sv = H2sv - h2e;
63 F1sv = F1sv - 36;
64 F2sv = F2sv - 36;
65
66 %% Criacao da estrutura de dados completa
67 % DATA
68 resposta = iddata([H1s, H2s],[F1s,F2s],0.5);
69 resposta.InputName = {'F1','F2'};
70 resposta.OutputName = {'H1','H2'};
71
72 %% Criacao da estrutura de dados de identificacao
73 % DATA
74 dados_ident = iddata([H1si, H2si],[F1si,F2si],0.5);
75 dados_ident.InputName = {'F1','F2'};
76 dados_ident.OutputName = {'H1','H2'};
77
78 %% Criacao da estrutura de dados de validacao
79 % DATA
80 dados_valid = iddata([H1sv, H2sv],[F1sv,F2sv],0.5);
81 dados_valid.InputName = {'F1','F2'};
82 dados_valid.OutputName = {'H1','H2'};
83
84 %% Plotagem da estrutura de dados completa
85 figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
86 plot(resposta);
87 title('Entradas (F1 e F2) e Saídas (H1 e H2) do sistema');
88
89 %% Obtencao do sistema inicial com 'idgrey()'
90 % 'Filename'
91 funcao_modelo = 'modelo2tanques_nl';
92
93 % 'Order'
94 ordem = [2 2 2];
95
96 % 'parameters'
97 % Abordagem com valores iniciais unitarios nas constantes
98 % k1 = 1;
99 % k2 = 1;
100 % k3 = 1;
101 % k4 = 1;
102
103 % Abordagem com palpites iniciais nas constantes
104 k1 = 0.08963;
105 k2 = 0.06466;
106 k3 = 3.5;
107 k4 = 3.3;

```

```

108 % alpha = k3 / (2 * sqrt(h1ei - h2ei));
109 % beta = k4 / (2 * sqrt(h2ei));
110
111 parametros_modelo = [k1; k2; k3; k4];
112
113 % 'SYSINIT' = idnlgrey(FileName, Order, Parameters)
114 estrutura_modelo = idnlgrey(funcao_modelo, ordem, parametros_modelo);
115
116 %% Obtencao do modelo caixa-cinza com 'nlgreyest()'
117 % SYS = nlgreyest(DATA, SYSINIT, OPTIONS)
118 opcoes_nlgreyest = nlgreyestOptions;
119 opcoes_nlgreyest.Display = 'on';
120 % SearchMethod = {'auto'(default)|'gn'|"gna"|"lm"|"grad"|"lsqnonlin'}
121 opcoes_nlgreyest.SearchMethod = 'lsqnonlin'; % least squares
122 opcoes_nlgreyest.SearchOption.MaxIter = 50;
123 % opcoes_nlgreyest.SearchOption.Advanced.RelImprovement = 0.5;
124 modelo_caixa_cinza_nl = nlgreyest(dados_ident, estrutura_modelo, opcoes_nlgreyest);
125 present(modelo_caixa_cinza_nl);
126
127 %% Validacao do modelo
128 figure('units', 'normalized', 'outerposition', [0 0 1 1]);
129 compare(dados_valid, modelo_caixa_cinza_nl);
130 title('Validação do modelo');

```

Script que descreve a estrutura caixa-cinza não linear do modelo a se identificar, 'modelo2tanques_nl.m':

```

1 function [dx, y] = modelo2tanques_nl(t, x, u, k1, k2, k3, k4, varargin)
2
3 % Equacoes de saida
4 y = [x(1);          ... % H1
5      x(2)           ... % H2
6      ];
7
8 dx1x2 = x(1) - x(2);    ... % H1 - H2
9 dx2 = x(2);            ... % H2
10 sqx1x2 = sign(dx1x2)*(abs(dx1x2)^(0.5));    ... % sqrt(H1 - H2)
11 sqx2 = sign(dx2)*(abs(dx2)^(0.5));        ... % sqrt(H2)
12
13 % Equacoes de estado
14 dx = [k1*u(1) - k3*sqx1x2;                ... % H1
15      k2*u(2) + k3*sqx1x2 - k4*sqx2       ... % H2
16      ];

```