



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA



TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

IDENTIFICAÇÃO EM MALHA FECHADA
DE UMA PLANTA DE BIODIESEL

DEISI BOZZA

Porto Alegre, Novembro de 2010.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TÍTULO

IDENTIFICAÇÃO EM MALHA FECHADA
DE UMA PLANTA DE BIODIESEL

AUTORA

DEISI BOZZA

ORIENTADOR

JORGE OTÁVIO TRIERWEILER

Professor do Departamento de Engenharia Química
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Trabalho de conclusão de curso de graduação,
apresentado como requisito parcial para a
obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Porto Alegre, Novembro de 2010.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler pela atenção, conhecimentos transmitidos e grande ajuda neste trabalho.

Ao Prof. Carlos Alberto Krahl pela colaboração e por permitir que este estudo fosse realizado na planta piloto de produção de Biodiesel da CIENTEC.

Aos profissionais da CIENTEC, em especial aos engenheiros e técnicos do Laboratório de Reatores e Cinética Aplicada, pela acolhida e suporte durante a realização dos testes.

Aos meus pais e irmão pelo incentivo, paciência, dedicação e carinho ao longo desta jornada.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	vii
RESUMO	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS.....	3
2.1. Planejamento de Perturbações, Coleta e Tratamentos dos Dados	4
2.2. Seleção da Estrutura do Modelo.....	4
2.2.1. Linearidade	5
2.2.2. Invariância no tempo	5
2.2.3. Concentração de parâmetros.....	5
2.3. Identificação de Modelos.....	6
2.4. Validação do Modelo.....	7
3. METODOLOGIA COMPUTACIONAL DE RESOLUÇÃO.....	8
3.1. Estruturas de modelos polinomiais.....	9
3.2. Operador Deslocamento	9
3.3. Modelos polinomiais discretos no tempo	10
4. ESTUDO DE CASO	13
4.1. Produção de Biodiesel	13
4.2. Descrição da Planta Piloto.....	15
4.3. Caracterização do Problema de Controle	16
4.4. Identificação do Comportamento da Planta	17
4.5. Resultados e Discussão.....	24
5. CONCLUSÕES	32
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Interface da ferramenta <i>System Identification Toolbox</i>	8
Figura 3-2: Diagramas de blocos das principais estruturas de modelos discretos.....	11
Figura 4-1: Etapas da reação de transesterificação.....	14
Figura 4-2: Representação do reator de leito fixo utilizado na produção de Biodiesel.	16
Figura 4-3: Representação esquemática das malhas de temperatura e pressão do sistema. .	16
Figura 4-4: P&I da planta piloto de produção de biodiesel.....	17
Figura 4-5: Resultados do teste degrau para a malha de temperatura.	19
Figura 4-6: Resultados do teste degrau para a malha de pressão.	20
Figura 4-7: Comparação entre os valores da variável manipulada, x , ao longo do tempo com o valor médio observado.....	22
Figura 4-8: Estudo da relação entre as malhas de temperatura e pressão.....	23
Figura 4-9: Modelos identificados para a malha de temperatura.	25
Figura 4-10: Resposta dos modelos BJ_2 e ARX ao degrau.....	26
Figura 4-11: Modelos identificados para a malha de pressão.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Resumo das principais características dos modelos polinomiais lineares presentes no System Identification Toolbox.	11
Tabela 4-1: Parâmetros obtidos para a malha de temperatura sem considerar a influência da pressão.	27
Tabela 4-2: Parâmetros obtidos para a malha de temperatura considerando a influência da pressão.	27

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a	Constante
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ASTM	<i>American Standard Testing Methods</i>
b	Constante
CC	Método de Cohen e Coon
C_v	Coefficiente de vazão
e(t)	Ruído branco
G_g	Relação entre as massas específicas dos fluidos
G(q)	Modelo da dinâmica processo
H(q)	Modelo de ruído
IMC	Método do Modelo Interno
M	Conjunto de modelos identificados
P	Pressão
PID	Controlador proporcional-integral-derivativo
Pot	Potência
PRBS	<i>Pseudo Random Binary Signal</i>
q	Operador deslocamento (<i>shift operator</i>)
t	Tempo
T	Temperatura
T_s	Tempo de amostragem
u(t)	Variável de entrada/manipulada
x	Abertura da válvula
Y	Fator de expansão
y(t)	Variável de saída/controlada
y_{set}	Sinal de referência ou <i>setpoint</i> do sistema
ZN	Método de Ziegler Nichols
ε	Erro de predição

RESUMO

A identificação de modelos é uma das etapas determinantes na escolha e implementação de uma estratégia de controle para um sistema industrial, pois influencia diretamente no tipo de controle que será adotado, além de servir de base para o ajuste dos parâmetros do controlador. A realização da identificação em malha fechada também tem se mostrado muito importante por possibilitar o estudo de sistemas que já possuem um controlador pré-existente, que apresentam comportamento integrador ou que são instáveis em malha aberta.

Este trabalho apresenta um estudo de caso, no qual é realizada a identificação do modelo de uma planta piloto para produção de biodiesel a partir de metanol e óleo de soja. A identificação é feita em malha fechada a fim de garantir a segurança da planta, que opera em elevadas pressões. Com o auxílio da ferramenta de identificação do Matlab (*System Identification Toolbox*) empregou-se o método direto de identificação, já conhecido e bastante difundido nos meios acadêmicos e industriais.

Os resultados obtidos mostram a importância do planejamento de perturbações e do uso dos instrumentos corretos, além da influência do controlador, para se conseguir um modelo que represente verdadeiramente o comportamento do sistema em estudo.

1. INTRODUÇÃO

O controle de processos é uma das áreas tecnológicas fundamentais para o aumento da rentabilidade das unidades industriais e tem garantido a competitividade de muitas empresas no atual mercado, que está cada vez mais exigente. A aplicação das tecnologias de controle nos mais variados processos industriais traz muitos benefícios, tais como: aumento da qualidade dos produtos; diminuição da necessidade de reprocessamento de produtos, ou seja, dispondo de um sistema de controle adequado o percentual de produtos fora de especificação tende a diminuir, reduzindo a quantidade de produto que precisa ser recirculada; aumento da confiabilidade dos sistemas, pois um controlador bem ajustado evita que os equipamentos operem em regiões instáveis ou indesejadas, onde a deterioração das válvulas, atuadores e instrumentos ligados ao processo ocorre mais rapidamente; além de garantir a segurança da unidade e a liberar os operadores de uma série de atividades manuais e repetitivas.

Dentre as formas de controladores disponíveis, o tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é, sem dúvida, o mais usado em sistemas de malha fechada na área industrial, pois este controlador apresenta uma estrutura versátil, bom desempenho, possui poucos parâmetros a serem sintonizados ou ajustados, além de permitir uma fácil associação entre os parâmetros de sintonia e o desempenho.

No entanto, antes de se definir uma estratégia de controle para um determinado sistema e realizar o ajuste dos parâmetros do controlador, é de suma importância estudar o comportamento do sistema a fim de identificar o modelo que melhor descreve o sistema.

A obtenção de um modelo pode ser feita através da modelagem caixa branca, caixa preta ou caixa cinza. A modelagem caixa preta, também conhecida como modelagem empírica, é mais rápida e fácil que as demais, porém requer a realização de testes de identificação, que consistem em alterar as variáveis manipuladas com o objetivo de promover variações nas variáveis controladas e assim determinar o comportamento do sistema.

Os testes de identificação podem ser realizados em malha aberta ou malha fechada. A identificação em malha aberta em alguns casos implica em custos elevados, uma vez que

pode gerar produtos fora de especificação durante o período de testes, e também se torna um procedimento inviável nos casos em que a planta é instável em malha aberta, possui comportamento integrador ou quando o processo ocorre em condições de operação muito drásticas, como elevadas temperaturas e pressões, por questões de segurança. Dentro desse contexto, a opção de proceder aos testes em malha fechada tem se mostrado uma solução eficiente para minimizar os problemas encontrados quando se realiza a identificação em malha aberta.

Após se ter identificado uma série de modelos que seriam capazes de descrever o comportamento da planta deve-se, então, definir um critério para a escolha do modelo que incorpora as características de interesse do sistema original. Alguns dos critérios de validação são baseados em considerações estatísticas, outros consistem em quantificar o erro obtido na predição da resposta ao degrau, resposta em frequência, ou ainda, pela localização dos polos e zeros.

Depois de definir o modelo que melhor representa o sistema, a próxima etapa diz respeito a definição dos parâmetros do controlador. O ajuste pode ser feito através de métodos clássicos, como o de Ziegler e Nichols (ZN), o de Cohen e Coon (CC), Modelo Interno (IMC), Integral do Erro, ou métodos mais modernos, como o método de otimização sequencial iterativo (FACCIN, 2004).

Este Trabalho de Diplomação em Engenharia Química irá abordar no Capítulo 2 a metodologia de identificação de modelos através de uma breve revisão bibliográfica. No Capítulo 3, serão descritos os fundamentos básicos presentes na ferramenta de identificação do Matlab, o *System Identification Toolbox*. Em seguida, no Capítulo 4, será apresentado um estudo de caso, que consiste na identificação de um modelo para uma planta piloto de produção de biodiesel a partir de óleo de soja, neste mesmo capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos descritos no Capítulo 2. Por fim, o Capítulo 5 irá reunir as conclusões obtidas a partir da realização deste estudo.

2. IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS

A identificação de um modelo consiste na determinação de uma equação matemática que seja capaz de reproduzir as principais características observadas em um sistema real, a qualquer instante de tempo. Essa equação pode ser obtida através da modelagem caixa branca, da modelagem caixa preta ou ainda da modelagem caixa cinza (AGUIRRE, 2007).

A modelagem caixa branca, também conhecida como modelagem conceitual ou rigorosa, se baseia na utilização de equações governantes do sistema, ou seja, equações físicas que descrevem os fenômenos que ocorrem no sistema real, para a construção de um modelo matemático. Esse tipo de modelagem requer o total conhecimento do sistema a ser modelado, além de exigir um tempo considerável para a dedução e estimação de parâmetros.

Uma alternativa que conduz a redução do tempo gasto durante o processo de modelagem é a chamada modelagem caixa preta, empírica ou, simplesmente, identificação. Para se obter um modelo através dessa técnica não é preciso ter nenhum conhecimento prévio do sistema, pois ele utiliza a relação de causa e efeito existente entre as variáveis de entrada e saída para a determinação do modelo. Porém, é necessária a realização de testes de identificação que podem acarretar em custos operacionais elevados, pois tendem a gerar produtos fora de especificação no período de testes.

Outra forma de se obter um modelo é através da modelagem caixa cinza, que consiste na fusão dos outros dois tipos de modelagem. Nesse método, utiliza-se o conjunto de dados obtidos experimentalmente e uma informação auxiliar que pode ser proveniente de equações físicas (AGUIRRE, 2007).

Dentre essas opções de modelagem a que se destaca é a empírica, pela sua simplicidade e facilidade de aplicação, além fornecer resultados satisfatórios. Segundo Machado (2004), a identificação pode ser dividida em 4 (quatro) etapas básicas, que são: i) planejamento de perturbações, coleta e tratamento dos dados, ii) seleção da estrutura e tipo de modelo, iii) identificação do modelo e iv) validação dos modelos obtidos. Nas seções a seguir serão discutidas cada uma destas etapas separadamente.

2.1. Planejamento de Perturbações, Coleta e Tratamentos dos Dados

O planejamento de perturbações é feito, geralmente, com base em dados do histórico da planta, quando estes estão disponíveis. Durante o planejamento também é importante levar em consideração os valores limites que as variáveis do sistema podem assumir e o tempo de engenharia disponível para a realização dos testes. Os tipos de perturbações mais conhecidos e aplicados são: a perturbação degrau ou *step*, PRBS (*Pseudo Random Binary Signal*), relé ideal e relé com saturação (MACHADO, 2004).

A perturbação degrau ou *step* é aquela que promove uma variação brusca e permanente em uma das variáveis do sistema, a partir um instante de tempo, t . Essa variação abrupta faz com que a variável atinja um novo valor, superior ou inferior. Nos testes de identificação é aconselhável se realizar *steps* tanto no sentido positivo quanto negativo, para obterem-se informações mais completas sobre o sistema. Esse tipo de perturbação é preferível pela sua facilidade de aplicação e de interpretação dos resultados (COUGHANOWR e KOPPEL, 1978).

A etapa de testes pode ser conduzida em malha aberta, sem a presença do controlador, ou em malha fechada, quando o controlador está atuando na planta. A identificação em malha aberta requer um período maior para a aplicação dos testes, visto que a malha demora mais para atingir o estado estacionário, além de não poder ser aplicada aos casos em que o sistema possui um comportamento integrador, é instável em malha aberta, e em plantas que não podem operar em malha aberta, pois trabalham em condições críticas de temperatura ou pressão, por exemplo, por questões de segurança. A fim de evitar estes problemas, tem-se optado pela identificação em malha fechada (RACOSKI, 2009).

Após a coleta dos dados é preciso realizar o tratamento dos mesmos, que inclui a filtragem, processo utilizado para remover ruídos que podem mascarar comportamentos importantes e prejudicar a correta identificação do modelo.

2.2. Seleção da Estrutura do Modelo

A decisão do tipo de estrutura de modelo mais adequada para representar o sistema real é feita com base nas simplificações que podem ser adotadas para descrever o sistema e

nos tipos de modelos existentes. Segundo Aguirre (2007), as simplificações estão associadas aos conceitos de linearidade, invariância no tempo e concentração de parâmetros, que serão discutidos a seguir.

2.2.1. Linearidade

Um sistema linear é aquele que satisfaz o princípio da superposição. Conforme a definição proposta por Aguirre (2007), se um sistema é excitado por um sinal de entrada $u_1(t)$ e produz uma resposta $y_1(t)$, e quando é excitado por $u_2(t)$ gera um sinal $y_2(t)$ de saída, ele será dito linear se ao produzir uma excitação $a.u_1(t)+b.u_2(t)$ sua saída for $a.y_1(t)+b.y_2(t)$.

Caso o sistema não satisfaça esse princípio ele é considerado não linear. A maioria dos sistemas reais é não linear, porém, devido a dificuldade que essa não linearidade acrescenta em todo o processo de identificação, prefere-se trabalhar com um sistema linear que represente apenas as características principais do sistema real.

2.2.2. Invariância no tempo

Quando um deslocamento de tempo na entrada do sistema causa um deslocamento de tempo na saída, diz-se que o sistema é invariante no tempo. Fisicamente, significa que a dinâmica não varia consideravelmente com o tempo. Caso contrário, o sistema é dito variante no tempo (AGUIRRE, 2007).

2.2.3. Concentração de parâmetros

Os parâmetros concentrados dizem respeito aos sistemas que apresentam variações somente com o tempo, ao contrário dos sistemas a parâmetros distribuídos nos quais as variáveis são função do tempo e do espaço.

Além de definir quais simplificações são válidas para o caso em estudo, também é necessário escolher o tipo de modelo que será utilizado. Existem 3 (três) classificações básicas, que são: estáticos ou dinâmicos, determinísticos ou estocásticos e discretos ou contínuos.

Os modelos estáticos representam a relação entre variáveis que não sofrem variações no tempo, podendo ser descritos por equações algébricas. Já os modelos dinâmicos são utilizados quando a evolução das variáveis com o tempo é relevante.

A diferenciação entre modelos determinísticos e estocásticos reside na aleatoriedade das variáveis. No caso de um sistema estocástico, a saída do processo em um determinado instante de tempo, t , não pode ser exatamente determinada a partir de dados referentes ao passado, porém tal relação é verdadeira quando se trata de um sistema determinístico.

Os termos discreto e contínuo são usados para definir qual a relação do sistema com o tempo. Se o sistema pode ser descrito através de uma equação diferencial e a sua evolução ocorre continuamente ao longo do tempo, o mesmo é chamado de contínuo. Porém, se o sistema é descrito por uma equação a diferenças e a sua representação temporal ocorre em instantes pontuais, ele é denominado discreto (AGUIRRE, 2007).

2.3. Identificação de Modelos

A etapa de identificação de um sistema que opera em malha fechada pode ser feita utilizando-se os métodos direto ou indireto.

A técnica de identificação direta de modelos consiste em aplicar um método de predição do erro aos dados de observação sem considerar a presença do controlador, ou seja, os valores de entrada e saída são tratados como se tivessem sido obtidos em malha aberta (RACOSKI, 2009). Os modelos utilizados por este método, geralmente, seguem a Equação 2.1.

$$y(t) = G(q) \cdot u(t) + H(q) \cdot e(t) \quad (2.1)$$

onde $y(t)$ representa o sinal de saída, $u(t)$ é o sinal de entrada, $e(t)$ é o ruído branco e $G(q)$ e $H(q)$ são funções racionais que representam o modelo da dinâmica e do ruído, respectivamente.

O método indireto exige o conhecimento prévio dos parâmetros do controlador que está atuando na planta, pois além dos dados experimentais emprega a equação do controlador para a obtenção do modelo. Tal método se torna mais complicado, pois nem

sempre os parâmetros do controlador estão disponíveis ou são conhecidos (MACHADO, 2004; RACOSKI, 2009).

2.4. Validação do Modelo

A determinação do melhor modelo para a planta em estudo é feita através da análise do conjunto M de modelos identificados na etapa anterior, procedimento conhecido como validação. Existem diversos critérios de validação de modelos, um deles baseia-se na medida do erro existente entre o valor predito pelo modelo e o valor dos dados de observação, tal critério é denominado critério do erro (MACHADO, 2004). Matematicamente, esse critério é formulado como um problema de minimização quadrática, representado pela Equação 2.2.

$$\sum [\varepsilon(t)]^2 = \sum_{k=1}^n \left(y_k - \hat{y}_{k|k-1} \right)^2 \quad (2.2)$$

sendo que $\varepsilon(t)$ é o erro, y_k é o valor medido e $\hat{y}_{k|k-1}$ é a predição do modelo.

Porém, nem sempre o modelo que apresenta o menor erro corresponde ao modelo que representa melhor o sistema real. Por esse motivo, Machado (2004) desenvolveu um novo critério de validação baseado na derivada do erro de predição. Este critério da derivada também é um problema de otimização, onde se busca um modelo que minimize a derivada do erro, formulada de acordo com a Equação 2.3.

$$\sum \left[\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]^2 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{d}{dt} y_k - \frac{d}{dt} \hat{y}_{k|k-1} \right)^2 \quad (2.3)$$

onde $d\varepsilon(t)/dt$ é o erro da derivada, dy_k/dt é a derivada do sinal medido e $d\hat{y}_k/dt$ é a derivada da saída prevista pelo modelo. Cabe salientar que as derivadas são calculadas através da aproximação por diferenças finitas.

3. METODOLOGIA COMPUTACIONAL DE RESOLUÇÃO

O software utilizado para a resolução do problema de identificação é o Matlab, através da sua ferramenta *System Identification Toolbox*. Inserindo o comando *ident* no *workspace* é possível ter acesso a interface deste software, que é mostrada na Figura 3.1. Pelo menu “Data” pode-se importar dados dos *workspace* ou obter um conjunto de dados que servem como exemplo ilustrativo do funcionamento do programa. Por meio desta janela, na coluna denominada “Operations”, é possível realizar um pré-processamento dos dados, removendo ruídos, médias, selecionando os canais e o *range* de trabalho, entre outras opções.

Os dados que serão utilizados na estimação do modelo ficam disponíveis no “Working Data”. O menu “Estimate” permite escolher qual o tipo de modelo será utilizado pelo software para a identificação do modelo, as opções disponíveis são: modelos paramétricos, modelos espectrais e modelos baseados em correlações. Todos os modelos identificados pelo programa são mostrados nos retângulos abaixo do menu “Models”, selecionando um dos modelos é possível ver a saída do modelo, a resposta transiente do sistema, a resposta no domínio da frequência, os pólos e zeros da função e o espectro de ruído.

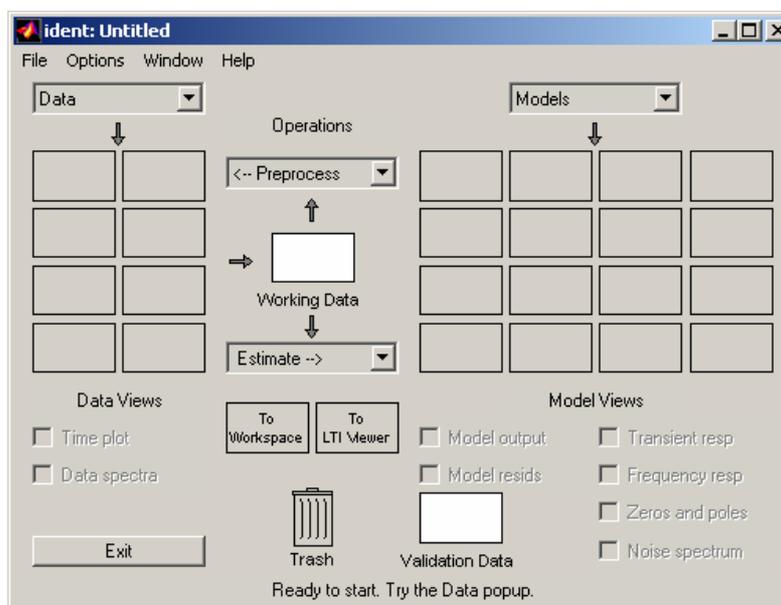


Figura 3-1: Interface da ferramenta *System Identification Toolbox*.

Os princípios matemáticos básicos utilizados por esta ferramenta são apresentados a seguir.

3.1. Estruturas de modelos polinomiais

A estimativa do modelo polinomial que irá representar o comportamento da planta em estudo pode ser feita utilizando os seguintes tipos de estruturas lineares:

$$A(q)y(t) = \sum_{i=1}^{nu} \frac{B_i(q)}{F_i(q)} u_i(t - nk_i) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (3.1)$$

onde A , B_i , C , D , E e F_i são polinômios que contém o operador deslocamento q . u_i é a i ésima entrada do sistema, nu é o número total de entradas e nk_i é o atraso da i ésima entrada que caracteriza o tempo morto. A variância do ruído branco, $e(t)$, é assumido como sendo λ .

Para estimar os modelos polinomiais, deve-se especificar a ordem do modelo como um conjunto de números inteiros que representam os coeficientes de cada polinômio que for incluído na estrutura selecionada – na para A , nb para B , nc para C , nd para D e nf para F . Também é necessário especificar o número de amostras da entrada, nk , com tempo morto.

O valor correspondente aos coeficientes do polinômio do denominador é igual ao número de polos do sistema, assim como o valor do coeficiente do polinômio do numerador é igual ao número de zeros mais 1 (um). Quando a dinâmica de $u(t)$ para $y(t)$ contém um atraso de nk amostras, então os primeiros coeficientes nk de B são zero (LJUNG, 1992).

3.2. Operador Deslocamento

A equação polinomial geral, Equação 3.1, é escrita em termos do operador deslocamento, denotado por q^{-1} . Para entender esse operador deslocamento de tempo, deve-se considerar a seguinte equação de diferença de tempo discreto:

$$y(t) + a_1 y(t - T_s) + a_2 y(t - 2T_s) = b_1 u(t - T_s) + b_2 u(t - 2T_s) \quad (3.2)$$

onde $y(t)$ é a saída, $u(t)$ é a entrada e T_s é o tempo de amostragem. Então, q^{-1} é um operador de mudança de tempo que representa de forma compacta equações de diferença usando $q^{-1}u(t) = u(t - T_s)$. Substituindo na Equação 3.2, tem-se que:

$$y(t) + a_1 q^{-1} y(t) + a_2 q^{-2} y(t) = b_1 q^{-1} u(t) + b_2 q^{-2} u(t) \quad (3.3)$$

ou

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) \quad (3.4)$$

Neste caso,

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} \quad (3.5)$$

$$B(q) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} \quad (3.6)$$

3.3. Modelos polinomiais discretos no tempo

As estruturas de modelos são subconjuntos do polinômio geral descrito na Equação 3.1. Os modelos diferem pelo número de polinômios que são incluídos na estrutura. Assim, estruturas de modelos diferentes oferecem diferentes níveis de flexibilidade para a modelagem dinâmica e características de ruído. A Figura 3.1 mostra a representação em diagramas de blocos das principais estruturas de modelos discretos.

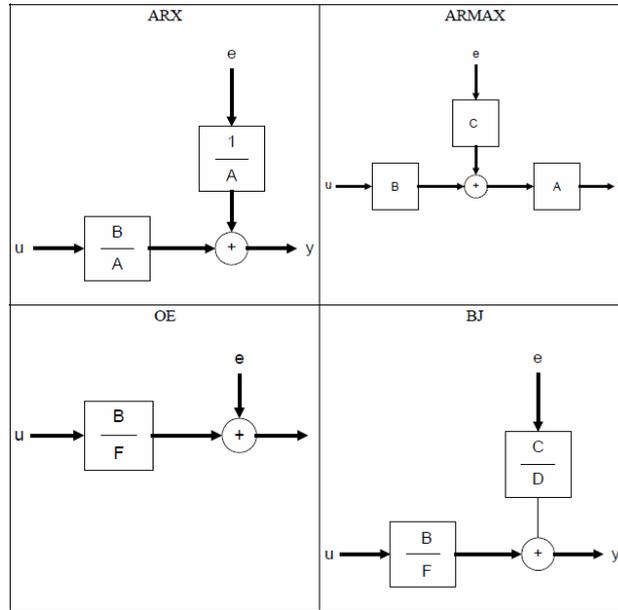


Figura 3-2: Diagramas de blocos das principais estruturas de modelos discretos.

As características básicas destas estruturas polinomiais lineares encontram-se resumidas na Tabela 3.1. Para o caso de já possuir uma estrutura específica para uma determinada aplicação, o usuário pode decidir se a dinâmica e o ruído têm polos iguais ou diferentes. $A(q)$ corresponde a situação na qual os polos são iguais para o modelo dinâmico e o modelo de ruído. A utilização de polos iguais é recomendada quando os distúrbios estão incorporados na entrada do sistema. F_i determina os polos exclusivos para a dinâmica do sistema, e D determina os polos que irão modelar os distúrbios (LJUNG, 1992).

Tabela 3-1: Resumo das principais características dos modelos polinomiais lineares presentes no System Identification Toolbox.

Estrutura do modelo	Equação de tempo discreto	Modelo de ruído
ARX	$A(q)y(t) = \sum_{i=1}^{nu} B_i(q)u_i(t - nk_i) + e(t)$	O modelo de ruído é $1/A$ e encontra-se acoplado à dinâmica do modelo. O ARX não permite que os modelos de dinâmica e ruído sejam independentes. Fornece um

		modelo simples com uma ótima representação para o ruído.
ARMAX	$A(q)y(t) = \sum_{i=1}^{m_u} B_i(q)u_i(t - nk_i) + Ce(t)$	Estende a estrutura do ARX proporcionando maior flexibilidade para a modelagem do ruído, pois utiliza o parâmetro C (média móvel do ruído branco). Utiliza-se o ARMAX quando os distúrbios são provenientes da entrada, ou seja, são distúrbios de carga.
Box-Jenkins (BJ)	$y(t) = \sum_{i=1}^{m_u} \frac{B_i(q)}{F_i(q)} u_i(t - nk_i) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t)$	Fornecer uma parametrização independente para a dinâmica e o ruído a partir de funções polinomiais racionais. Usa-se o BJ quando o ruído não é proveniente da entrada, mas de uma perturbação primária. Esta estrutura fornece flexibilidade adicional para a modelagem do ruído.
Output-Error (OE)	$y(t) = \sum_{i=1}^{m_u} \frac{B_i(q)}{F_i(q)} u_i(t - nk_i) + e(t)$	É recomendado para se obter parametrização da dinâmica do sistema, mas não para os casos em que deseja uma estimativa de modelo de ruído. Neste caso, a equação geral do modelo de ruído é $H=1$ e a fonte de ruído branco, $e(t)$, afeta somente a saída.

Fonte: LJUNG, 1992.

O System Identification Tool GUI suporta apenas os modelos polinomiais listados acima.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. Produção de Biodiesel

A maior parte de toda a energia consumida no mundo é proveniente do petróleo, do carvão e do gás natural. Entretanto, o consumo de combustíveis fósseis apresenta um impacto significativo na qualidade do meio ambiente. A poluição do ar, as mudanças climáticas, os derramamentos de óleo e a geração de resíduos sólidos tóxicos são resultados do vasto uso e da produção desses combustíveis. Todos esses fatores aliados ao iminente esgotamento das reservas mundiais de petróleos têm incentivado o desenvolvimento de novas fontes de energia renováveis para diversas áreas industriais, visando reduzir ou substituir os combustíveis de origem petrolífera.

Segundo Gamba (2009) uma das alternativas para a substituição de combustíveis fósseis é o biodiesel, pois o mesmo apresenta propriedades similares ou melhores às do diesel mineral, como densidade, viscosidade, número de cetano, ponto de fulgor, entre outras.

O biodiesel é composto de alquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivado de óleos vegetais ou de gorduras animais, conforme especificação contida na Resolução ANP nº7 (Agência Nacional do Petróleo, 2008) e ASTM D6751-08 (*American Standard Testing Methods*, 2008). Por ser biodegradável, não tóxico e, essencialmente, livre de enxofre e aromáticos, é considerado um combustível ecológico.

Estudos realizados comprovam que as emissões de gases poluentes, tais como o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), compostos poliaromáticos (CPAs) de alto poder carcinogênico, materiais particulados (MP), óxidos de enxofre (SO_x), são inferiores para o biodiesel em comparação ao diesel convencional, demonstrando que o uso deste em substituição ao combustível fóssil traz grandes benefícios para o meio ambiente (JULIATO, 2006; SOUZA, 2010).

O biodiesel pode ser usado puro ou misturado ao diesel em diversas proporções. A mistura de 2% em volume de biodiesel ao diesel de petróleo é chamado B2 e assim sucessivamente, até o biodiesel puro, denominado B100. Para cada quilograma de diesel

não usado, um equivalente a 3,11 kg de CO₂ deixará de ser produzido e mais um adicional de 15% a 20% referente à sua energia de produção (AGARWAL, 2007).

Existem três maneiras de se produzir biodiesel a partir de óleo vegetal: pirólise, micro-emulsão e transesterificação. O processo mais usado industrialmente é o de transesterificação, no qual ocorre a transformação de triglicerídeos em moléculas menores de ésteres de ácidos graxos.

A reação de transesterificação pode ser descrita, de maneira geral, como uma reação em que um éster é transformado em outro pela mudança na porção alcóxi. Esta transformação ocorre em três etapas sequenciais, conforme mostra a Figura 4.1, inicialmente as moléculas de triglicerídeos são convertidas em diglicerídeos, depois em monoglicerídeos e, finalmente em glicerol, produzindo um mol de éster alquílico a cada etapa reacional. Quando um éster alquílico reage com um álcool, o processo de transesterificação é denominado alcoólise.

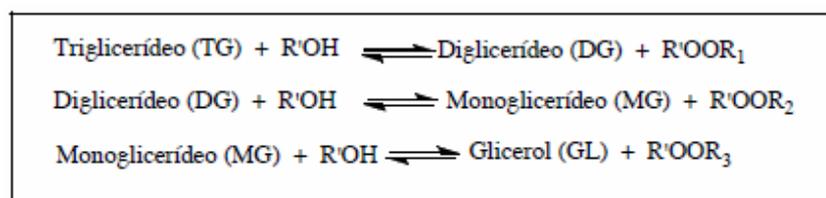


Figura 4-1: Etapas da reação de transesterificação.

Os álcoois, que são considerados agentes de transesterificação, usados nos processos são os álcoois metílico (metanol), etílico (etanol), propílico, butílico e amílico. O metanol é o mais utilizado devido ao seu baixo custo e às suas propriedades físico-químicas (polaridade e menor cadeia carbônica).

A transesterificação de óleos vegetais corresponde a uma reação reversível. Portanto, o rendimento da reação depende do deslocamento do equilíbrio em favor dos ésteres, e para se obter um rendimento elevado, o álcool tem que ser usado em excesso juntamente com a otimização de outros fatores como a concentração do catalisador, a temperatura e a agitação do meio reacional.

A alcoólise pode ser conduzida por uma variedade de rotas tecnológicas em que diferentes tipos de catalisadores podem ser empregados, como bases inorgânicas, ácidos,

catalisadores heterogêneos, bases orgânicas e enzimas. A transesterificação também pode ocorrer sem qualquer catalisador, utilizando metanol sob condições supercríticas (GAMBA, 2009).

4.2. Descrição da Planta Piloto

A planta em escala piloto na qual será baseado este trabalho visa a obtenção de biodiesel através da rota catalítica. O sistema é composto por dois tanques de armazenamento dos reagentes, metanol e óleo de soja, duas bombas Hp Séries 1100, utilizadas normalmente em cromatógrafos por fornecerem vazões exatas, um reator de inox recheado com catalisador, uma válvula de controle P-11, tipo linear com diâmetro do orifício de 0,042", C_v igual a 0,000036 e rangeabilidade de 15:1, e um tanque aberto para armazenamento dos produtos.

O reator é envolvido por um leito fluidizado de ar e areia a fim de manter a temperatura constante durante a reação. A areia que forma o leito é fluidizada através da injeção de ar comprimido na parte inferior do reator, utilizando-se um compressor e uma válvula do tipo borboleta. O aquecimento do ar é feito através da utilização de 4 (quatro) resistências elétricas que se encontram dentro do leito fluidizado. Cabe salienta que o reator de leito fixo onde ocorre a reação de transesterificação e o sistema de aquecimento estão separados fisicamente, logo a transferência de calor do leito fluidizado para o meio reacional ocorre através da parede de inox do reator que separa os dois sistemas.

A reação de transesterificação acontece dentro do reator de leito fixo, em regime contínuo, com uma vazão total de 0,30 mL/min, sendo 0,075 mL/min de metanol e 0,225 mL/min de óleo de soja. A temperatura do sistema é mantida a 200°C e a pressão de operação em torno de 50 bar. A pressão elevada visa manter todos os componentes na fase líquida, o que favorece a reação de produção de biodiesel. Uma representação esquemática do reator é mostrado na Figura 4.2.

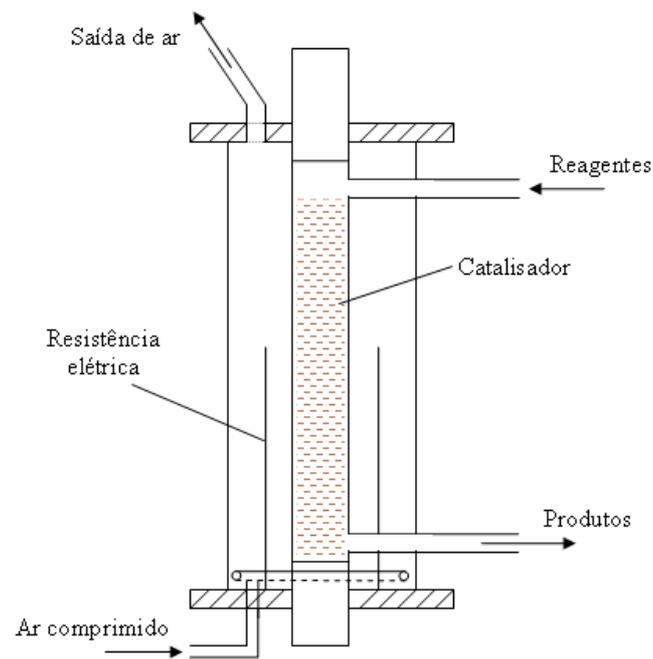


Figura 4-2: Representação do reator de leito fixo utilizado na produção de Biodiesel.

4.3. Caracterização do Problema de Controle

A planta de biodiesel possui duas malhas de controle *feedback*, uma malha de temperatura e uma malha de pressão, que são mostradas na Figura 4.3.

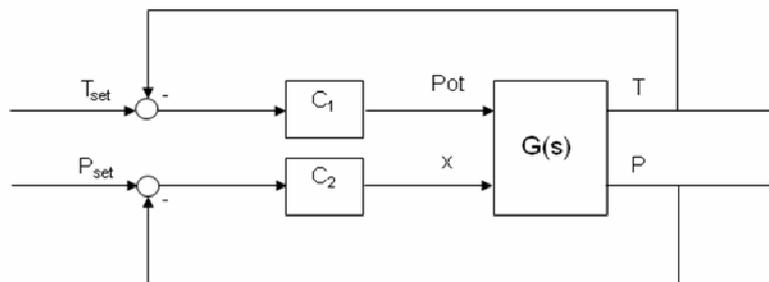


Figura 4-3: Representação esquemática das malhas de temperatura e pressão do sistema.

A malha de temperatura é composta por um medidor de temperatura, um termopar

do tipo K, que transmite o valor de temperatura medida no leito fluidizado para o controlador, que por sua vez manda um sinal para o potenciômetro que regula a intensidade da energia que é transmitida ao ar através das resistências elétricas. Este sinal enviado pelo controlador é baseado no erro existente entre o valor medido e o *setpoint*, promovendo variações de 0 a 100% na potência fornecida ao sistema.

Já o controle de pressão é feito por uma malha *feedback* formada por um medidor de pressão, um manômetro, e uma válvula de controle de vazão. O manômetro transmite o valor medido a cada instante para o controlador, com este valor o controlador calcula o erro e envia um sinal com a ação de controle para a válvula, que está localizada na saída do reator. Esta válvula se movimenta de acordo com a pressão no interior do sistema, se a pressão está abaixo do *setpoint*, a válvula recebe um sinal do controlador para diminuir a abertura, se está acima, recebe um sinal para aumentar a abertura, ou seja, é feita uma variação na vazão de saída dos produtos a fim de manter a pressão desejada dentro do reator. O P&I do sistema de produção de biodiesel é apresentado na Figura 4.4.

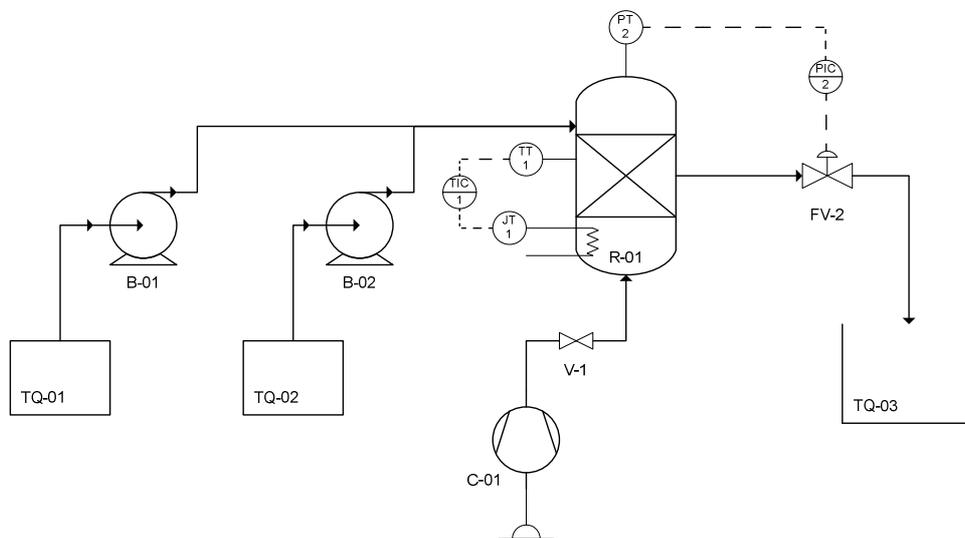


Figura 4-4: P&I da planta piloto de produção de biodiesel.

4.4. Identificação do Comportamento da Planta

A identificação do modelo que melhor representa o sistema iniciou com a realização

de teste degrau no *setpoint* das malhas de temperatura e pressão.

Inicialmente, procedeu-se a partida do sistema, que se encontrava fora de operação, ligando primeiramente as bombas que conduzem os reagentes, metanol e óleo de soja. Em seguida, ligou-se o compressor que fornece o ar necessário para promover a fluidização do leito responsável pelo aquecimento do sistema. Com os equipamentos em funcionamento fez-se a inserção dos valores de *setpoint* para a pressão, 50 bar, e para a temperatura, 200°C. Em 12,5 minutos a malha de pressão alcançou o valor do *setpoint*, e depois de mais 22 minutos a temperatura chegou ao valor desejado. Logo, o sistema demorou 34,5 minutos para atingir o estado estacionário.

Com o sistema em regime permanente, iniciou-se a realização dos testes de identificação. Primeiro, fez-se uma perturbação degrau na malha de pressão, de 50 bar para 60 bar, enquanto a temperatura foi mantida constante. Após 1 min, o valor de 60 bar foi atingido, o sistema permaneceu nesta faixa de pressão por aproximadamente 15 min. Em seguida, fez-se uma perturbação de igual intensidade porém em sentido contrário, retornando ao valor inicial de 50 bar.

A malha de temperatura foi, então, perturbada com um degrau de 10°C, de 200°C para 210°C. Transcorrido um tempo de 3,5 min atingiu-se o valor de temperatura desejado. Aproveitando este novo patamar de temperatura, realizou-se um *step* na malha de pressão, levando o sistema de 50 bar para 70 bar, este novo valor de pressão foi alcançado em 3 min. Em seguida, fez-se a diminuição da temperatura para o valor inicial, enquanto a pressão se manteve em 70 bar.

Tendo os dois parâmetros, temperatura e pressão, retornado aos seus valores iniciais, produziu-se uma perturbação simultânea do sistema, arbitrando *setpoints* de 205°C e 60 bar. Após terem sido alcançados os dois patamares, a redução dos valores de temperatura e pressão também foi feita de forma simultânea.

Outras variações foram feitas nos *setpoints* da temperatura e da pressão, seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente, apenas para obterem-se mais dados que possam confirmar o comportamento do sistema. Todo o procedimento de testes foi realizado em malha fechada a fim de garantir a segurança da unidade e os resultados obtidos para a malha de temperatura e pressão encontram-se nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente.

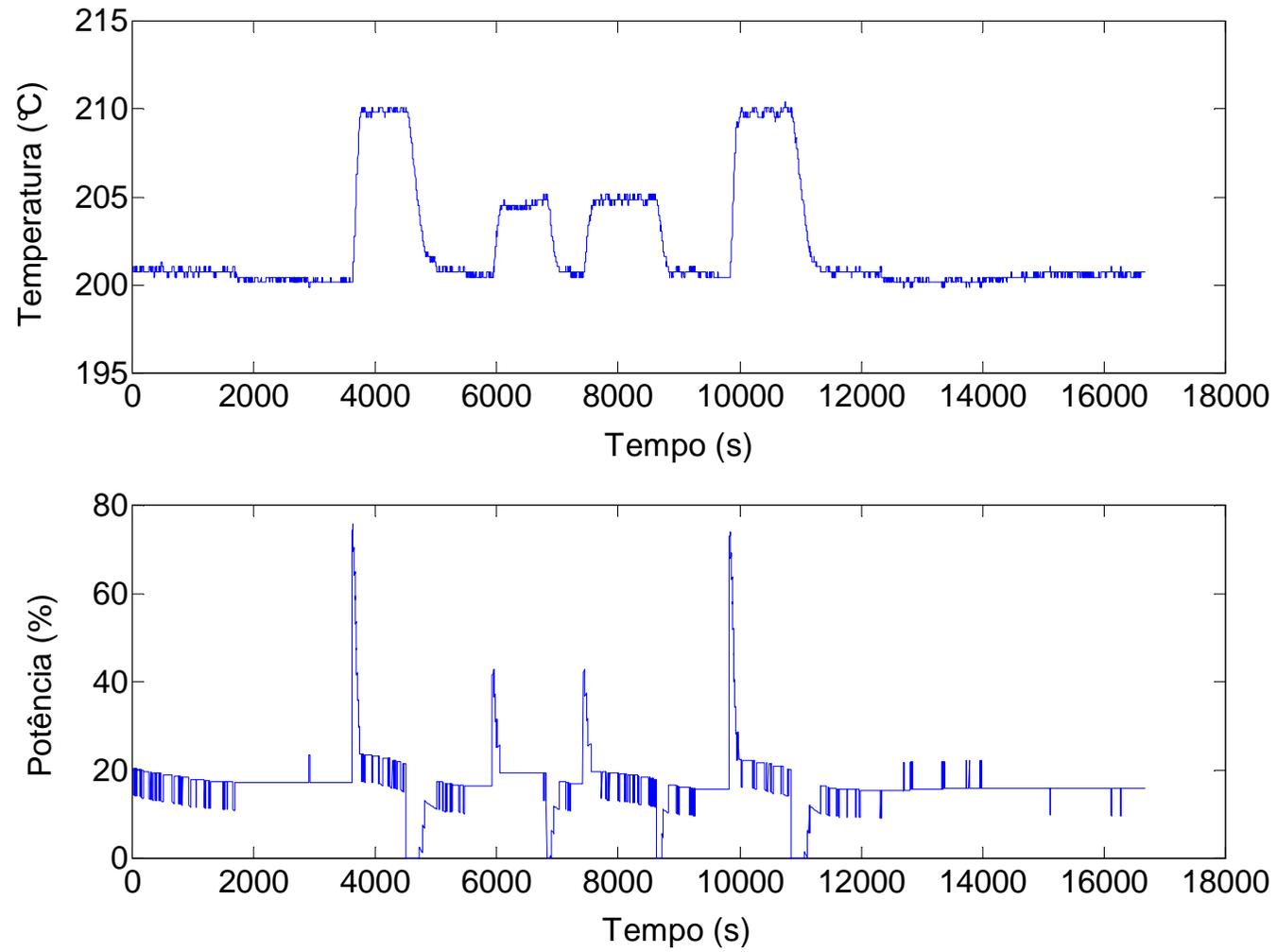


Figura 4-5: Resultados do teste degrau para a malha de temperatura.

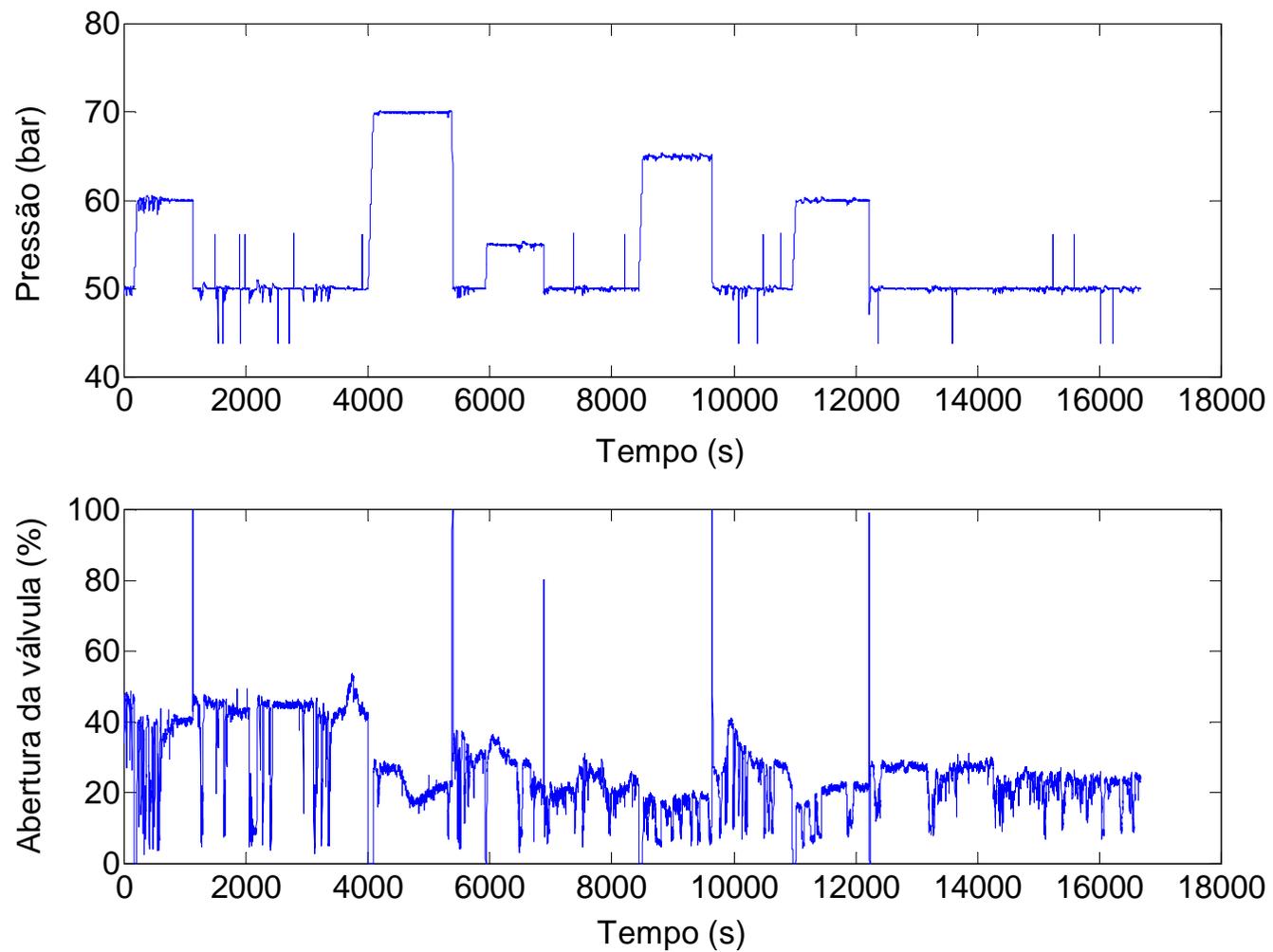


Figura 4-6: Resultados do teste degrau para a malha de pressão.

É importante salientar que os *steps* inseridos no *setpoint* da malha de temperatura foram de no máximo 10°C, pois durante a realização dos testes de identificação os profissionais responsáveis pela planta de produção de biodiesel estavam coletando amostras do produto final, para posterior avaliação da conversão obtida nas condições de operação já mencionadas anteriormente. Como a temperatura é uma das principais variáveis de interesse para a reação, os limites fixados pelos profissionais da CIENTEC tiveram que ser respeitados. Já para a malha de pressão a flexibilidade era maior, porque a operação em altas pressões tem por objetivo apenas manter os reagentes na forma líquida, logo foi possível realizar *steps* de até 20 bar.

Ao analisar os dados obtidos, percebe-se que na malha de temperatura os valores referentes às medidas da variável controlada encontram-se quantizados, pois a variação se dá em patamares e não de forma suave. Este problema de quantização ocorre porque o medidor de temperatura presente no sistema possui uma ampla faixa de medição, entre -190°C a 1200°C, e a placa de conversão do sinal analógico para digital é de 12 bits, estes dois fatores levam a uma resolução (ou quantização) de 0,34°C ($= (1200 + 190)/2^{12}$), isto é diferenças de temperaturas menores que este valor levarão a serem simplesmente truncados para o valor inferior mais próximo. A quantização pode ser percebida na Figuras 4.5, onde se pode ver que a temperatura foi discretizada através de uma sequência de degraus. Além deste problema constata-se que há presença de ruído em ambas as malhas, o que pode prejudicar a correta identificação do modelo.

A malha de pressão apresenta ainda um comportamento quase integrador, conforme pode ser visto na Figura 4.7, pois a abertura da válvula, x , mantém-se em torno de um valor médio, $x_{\text{médio}}$, de 26%, quase independentemente do valor de *setpoint* assumido pela pressão.

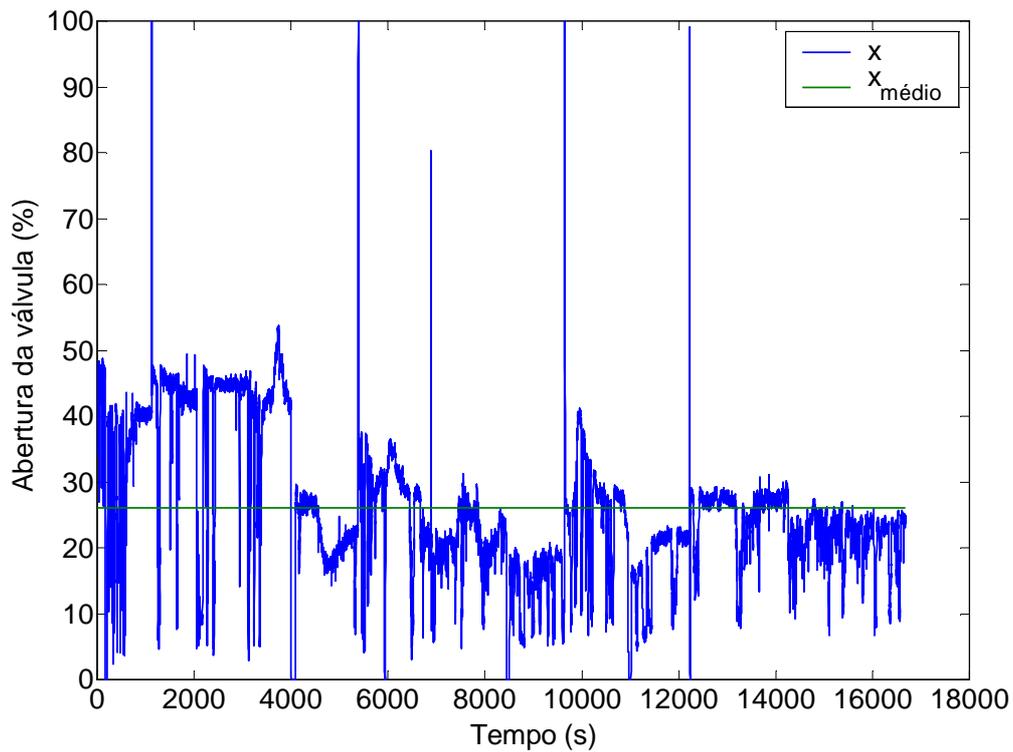


Figura 4-7: Comparação entre os valores da variável manipulada, x , ao longo do tempo com o valor médio observado.

Para evitar possíveis erros de identificação causados pelos ruídos, fez-se a filtragem dos dados com o auxílio do comando *idfilt* disponível no Matlab.

Após a filtragem, optou-se por plotar em um mesmo gráfico as duas variáveis controladas, T e P , e suas respectivas variáveis manipuladas, Pot e x , com o intuito de verificar a existência de uma possível relação entre as malhas 1 e 2. Este gráfico é apresentado na Figura 4.7.

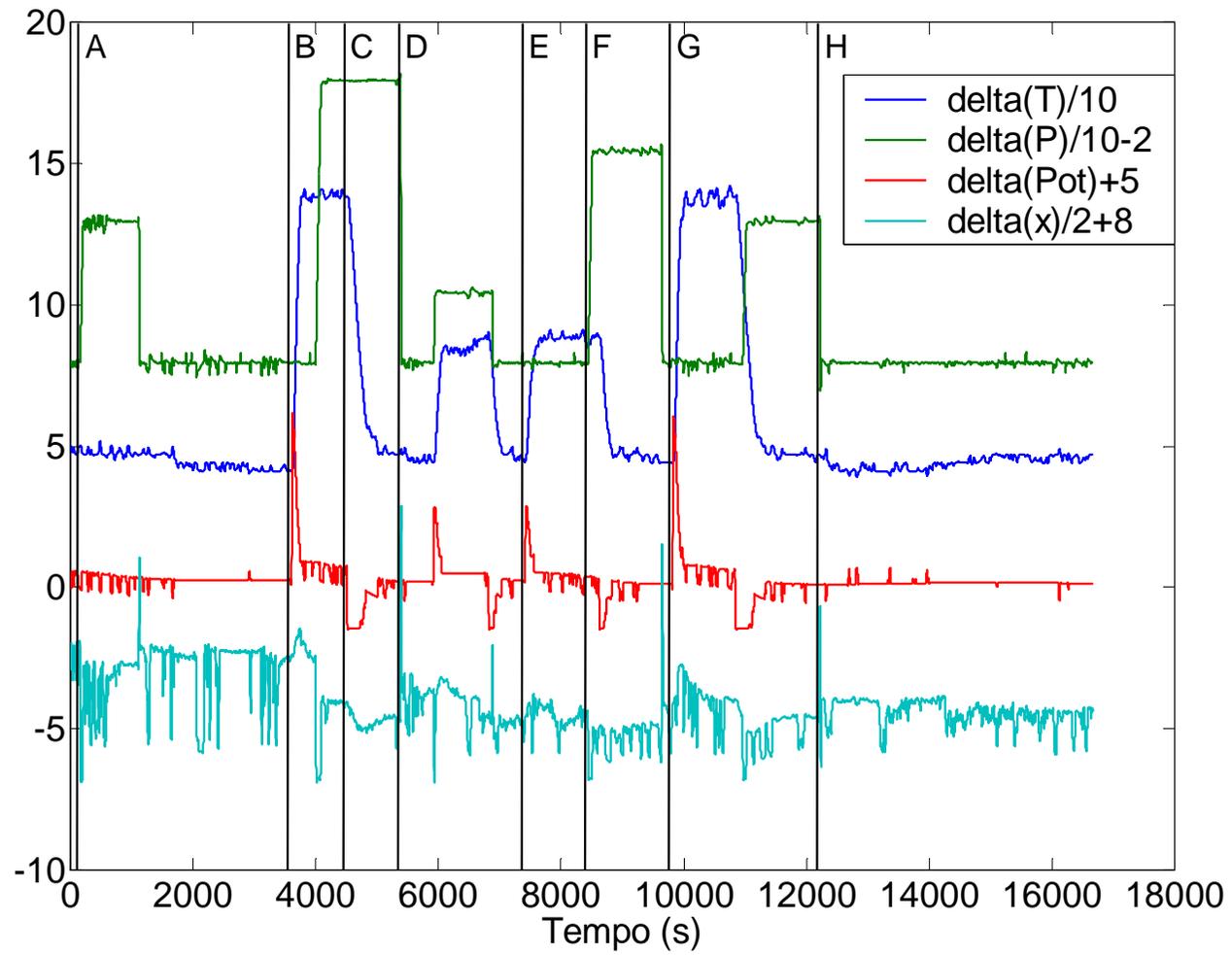


Figura 4-8: Estudo da relação entre as malhas de temperatura e pressão.

Analisando o gráfico acima se percebe pelas linhas A, D, F e H que ao produzir uma perturbação degrau na malha da pressão, tendo a temperatura constante, não há variação significativa na temperatura nem alteração da potência fornecida ao sistema, o que leva a conclusão de que a pressão não interfere na malha de temperatura.

Já ao comparar o comportamento registrado quando a perturbação degrau foi feita na malha de temperatura, mantendo a pressão constante, nota-se que apesar do valor de pressão permanecer praticamente constante, a variável manipulada, x , sofre alterações bruscas a fim de manter a pressão no valor desejado, isto pode ser visto principalmente nas linhas B, C, E e G. Conclui-se, então, que a malha de temperatura exerce influência sobre a malha de pressão, fato que deve ser considerado para proceder a correta identificação do modelo.

Portanto, na etapa de identificação do modelo da malha de pressão dever-se-á considerar os dados de pressão, abertura da válvula e temperatura.

Depois de perceber as peculiaridades de cada malha *feedback* que compõem o sistema, aplicou-se o método direto de identificação com o auxílio da ferramenta *System Identification Toolbox* do Matlab, descritos nos Capítulos 2 e 3 deste trabalho, para cada uma das malhas.

No caso da malha 1, realizou-se a identificação considerando, primeiramente, apenas os dados de temperatura e potência e em seguida, considerando os dados de temperatura, potência e abertura da válvula. Para a malha 2, de pressão, utilizou-se o mesmo método com os dados de pressão, abertura da válvula e temperatura. Os resultados obtidos serão apresentados na seção a seguir.

4.5. Resultados e Discussão

A aplicação do método de identificação direta nos dados referentes a malha de temperatura, através da ferramenta *System Identification* do Matlab, resultou nos modelos que constam na Figura 4.9.

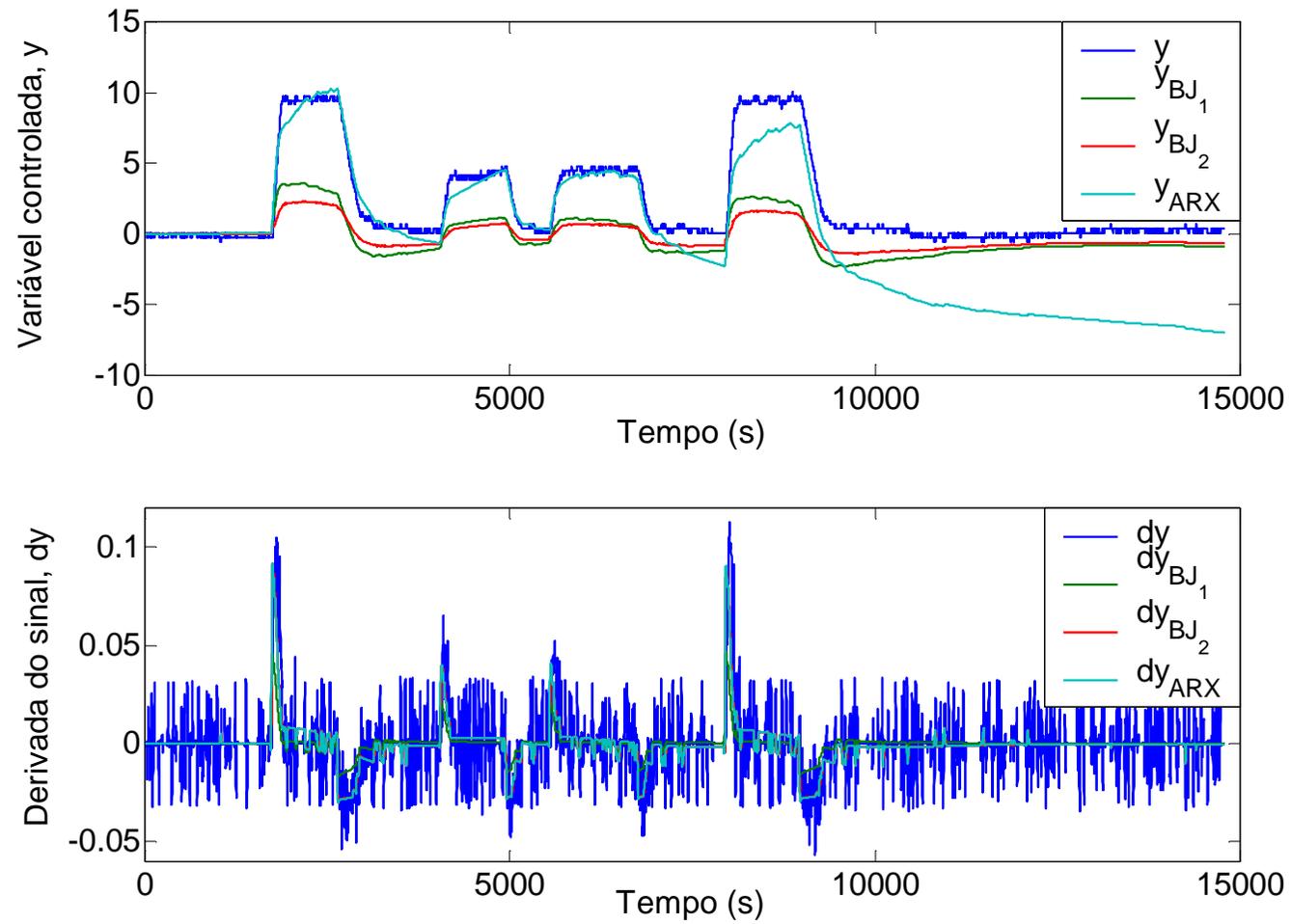


Figura 4-9: Modelos identificados para a malha de temperatura.

Os modelos ARX e BJ_2 foram identificados apenas com os dados de temperatura e potência. Já o BJ_1 foi identificado utilizando os dados de abertura da válvula, além da temperatura e potência. Em ambas as situações a estrutura que melhor representou o sistema dentro de toda a janela de observação foi a Box-Jenkins (BJ). O que também pode ser conferido na Figura 4.10, que mostra as respostas ao degrau para os dois tipos de modelo.

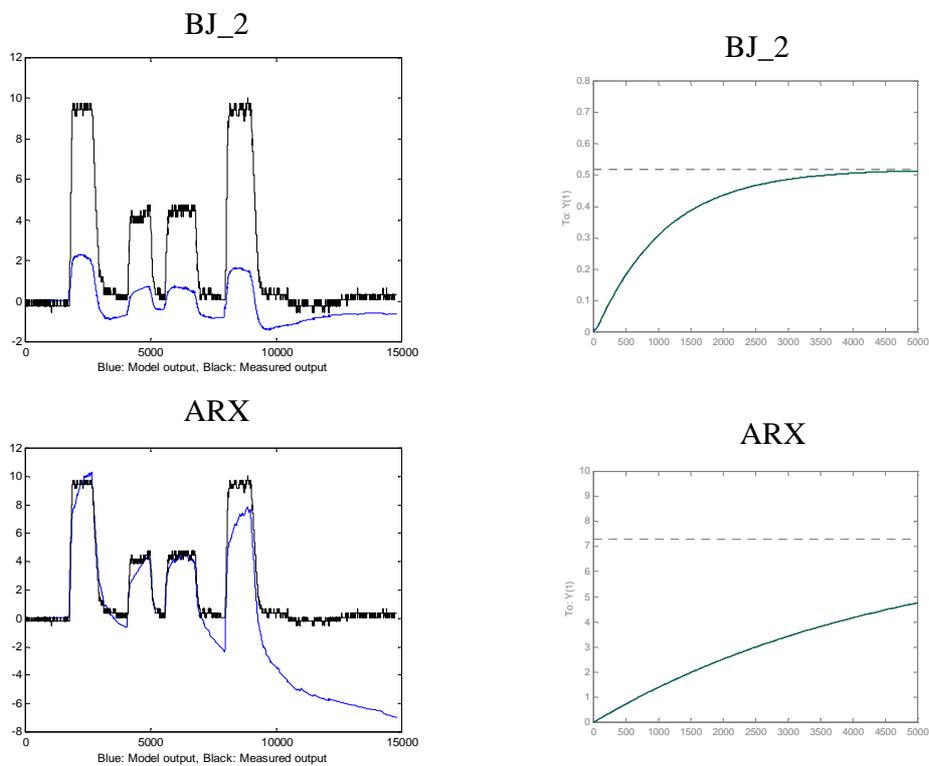


Figura 4-10: Resposta dos modelos BJ_2 e ARX ao degrau.

Apesar do modelo ARX ter se ajustado muito bem aos dados experimentais em alguns pontos, em outros pontos ele apresentou um comportamento crescente enquanto os dados do sistema real mantinham um valor constante. A estrutura do modelo BJ, considerada neste caso a melhor opção, é representada pela Equação 4.2.

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (4.2)$$

A Tabela 4.1 contém os parâmetros encontrados para o caso em que a influência da pressão sobre a malha de temperatura não foi considerada.

Tabela 4-1: Parâmetros obtidos para a malha de temperatura sem considerar a influência da pressão.

B(q)	C(q)	D(q)	F(q)
$0,001414 \cdot q^{-1}$	$1 + 0,9908 \cdot q^{-1}$	$1 - 1 \cdot q^{-1}$	$1 - 1 \cdot q^{-1}$

Resultando no polinômio da Equação 4.3.

$$\Delta T(t) = \frac{0,001414 \cdot q^{-1}}{1 - 1 \cdot q^{-1}} \Delta Pot(t) + \frac{1 + 0,9908 \cdot q^{-1}}{1 - 1 \cdot q^{-1}} e(t) \quad (4.3)$$

Quando a identificação foi feita levando em consideração a influência da pressão sobre a malha de temperatura os parâmetros obtidos foram os que se encontram listados na Tabela 4.2.

Tabela 4-2: Parâmetros obtidos para a malha de temperatura considerando a influência da pressão.

B ₁ (q)	B ₂ (q)	C(q)	D(q)	F ₁ (q)	F ₂ (q)
$0,001376 \cdot q^{-1}$	$0,0001566 \cdot q^{-1}$	$1 - 0,9905 \cdot q^{-1}$	$1 - 1 \cdot q^{-1}$	$1 - 1 \cdot q^{-1}$	$1 - 0,9986 \cdot q^{-1}$

Estes parâmetros resultam na Equação 4.4.

$$\Delta T(t) = \frac{0,001376 \cdot q^{-1}}{1 - 1 \cdot q^{-1}} \Delta Pot(t) + \frac{0,0001566 \cdot q^{-1}}{1 - 0,9986 \cdot q^{-1}} \Delta x(t) + \frac{1 + 0,9905 \cdot q^{-1}}{1 - 1 \cdot q^{-1}} e(t) \quad (4.4)$$

Comparando os polinômios obtidos para cada caso, comprova-se que a influência da pressão na temperatura não é relevante, pois os modelos identificados são muito parecidos para ambas as situações testadas.

Em seguida, aplicou-se o mesmo método de identificação para os dados de P , T e x referentes à malha 2. Porém, não foi possível obter um modelo que represente o comportamento da pressão frente às variações realizadas no sistema, conforme pode ser visto na Figura 4.9.

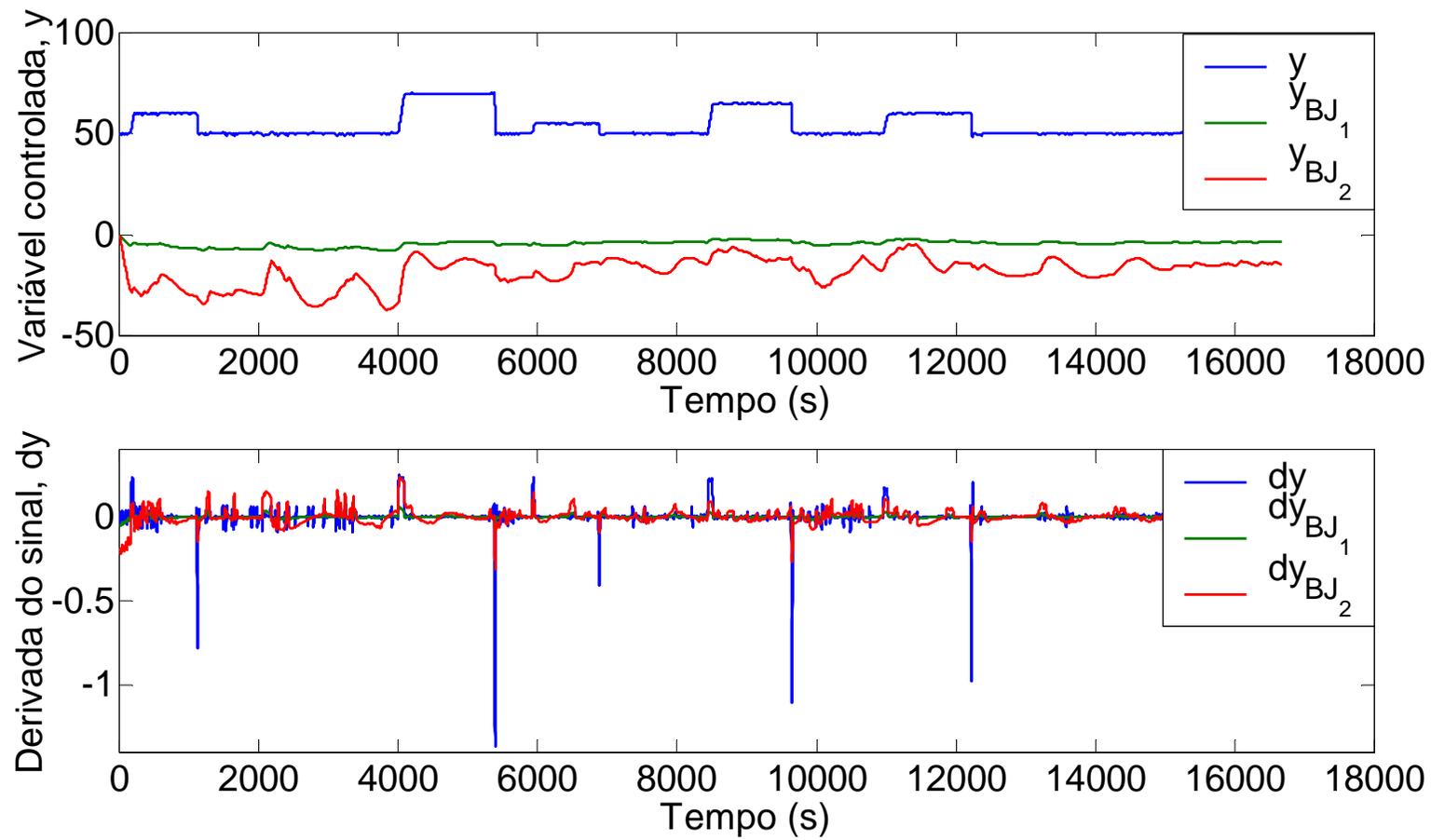


Figura 4-11: Modelos identificados para a malha de pressão.

Uma provável causa para o insucesso na identificação do modelo para a malha de pressão se deve ao fato de não ter sido utilizada a equação da válvula neste procedimento, visto que o software sozinho não foi capaz de relacionar de forma correta as duas entradas, x e T , com a saída, P .

A influência da temperatura na malha de pressão, possivelmente, se deve ao fato de que a vazão de saída dos produtos, dada pela Equação 4.1, depende não só da abertura da válvula, relacionada a $f(x)$, mas também da pressão dentro do sistema, P_1 , que por sua vez depende da temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a agitação das moléculas e maior a pressão que será exercida sobre as paredes do reator.

$$F = f(x)F_P C_V P_1 Y \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{P_1 G_g T_1 Z}} \quad (4.1)$$

onde Y é o fator de expansão, Z é fator de compressibilidade dos gases e T_1 é a temperatura dentro do reator, F é a vazão de saída dos produtos, C_V é o coeficiente de vazão, G_g é a razão entre a massa específica do gás frente a do ar fluido e a massa específica do ar, P_1 é a pressão dentro do sistema e P_2 é a pressão atmosférica

Considera-se que a Equação 4.1 é a mais adequada para descrever a vazão de saída dos produtos, pois apesar de se desejar que a reação ocorra na fase líquida e os produtos também saiam na forma líquida, constatação visual, não se sabe ao certo o que acontece dentro do reator. O fato dos produtos se encontrarem na fase líquida ao serem despejados no tanque de armazenamento pode ser explicada pela condensação dos mesmos ao longo da tubulação de descarga, pois esta última possui um diâmetro muito pequeno, aproximadamente 0,11 cm, o que favorece a transferência de calor entre a tubulação e o meio ambiente. Além do mais, a análise dos dados obtidos para a pressão nos leva a crer que o comportamento do fluido é semelhante ao de um gás, pois quando há uma variação da temperatura o fluido se expande ou se contrai fazendo com que o obturador da válvula se movimente a fim de corrigir este desvio.

Outra possível explicação para este comportamento pode ser o fato da mistura estar muito próxima da sua temperatura crítica, região caracterizada pelo comportamento

anômalo do sistema, ou seja, apesar dos componentes estarem na forma líquida os seus comportamentos se assemelham ao de um gás.

Porém, independentemente do motivo que leva o sistema a agir desta maneira, não é possível descartar a relação existente entre a pressão e a temperatura. Logo, uma sugestão para trabalhos futuros é a utilização da equação de dimensionamento da válvula para realizar a identificação da malha *feedback* responsável pelo controle da pressão do sistema, visto que somente os dados experimentais não foram suficientes para gerar um modelo capaz de representar de forma adequada o comportamento do sistema.

5. CONCLUSÕES

O estudo da identificação de modelos em malha fechada possibilitou a percepção de aspectos importantes quanto à metodologia e aos desafios encontrados para se obter um bom modelo para o sistema.

Primeiramente, pôde-se constatar que antes de iniciar o procedimento de testes deve-se planejar de forma adequada a série de perturbações que será aplicada ao sistema, com o intuito de verificar possíveis influências existentes entre as malhas que compõem a planta. Neste estudo de caso, observou-se que a malha *feedback* que controla a pressão dentro do reator é influenciada pela temperatura do leito de fluidização, pois ao aumentar ou diminuir a temperatura do leito, a abertura da válvula sofre variações a fim de manter a pressão constante. Tal comportamento só foi observado porque as perturbações foram realizadas de forma planejada, em uma malha de cada vez, porque perturbações simultâneas acabam por encobrir o real comportamento das variáveis.

Outro ponto importante, que interfere diretamente no procedimento de identificação, diz respeito ao tipo de instrumento que está instalado na planta. Conforme se constatou neste estudo, os dados da variável controlada da malha de temperatura encontram-se quantizados, por causa do uso de um medidor de temperatura inadequado, que possui um range de temperatura muito maior que a faixa de operação da planta, o que implica no registro de dados que possuem uma variação de temperatura maior que $0,34^{\circ}\text{C}$. Uma solução para este problema seria trocar o tipo de medidor utilizado, para um que possua uma faixa mais próxima da temperatura ótima de reação, ou limitar o range do medidor instalado.

Para a malha de temperatura conclui-se que a pressão não exerce uma influência considerável, sendo o modelo obtido com dados de temperatura e potência capaz de representar de maneira satisfatória os dados de planta.

Já para a malha de pressão, não foi possível identificar um modelo que representasse os dados obtidos através dos testes, pois o controlador que atua na referida malha possui um parâmetro correspondente a ação proporcional muito elevado, o que faz com que o mesmo seja muito agressivo, ou seja, qualquer erro implica em uma variação na

abertura da válvula muito intensa, dificultando a correta relação entre as variáveis manipulada e controlada. Uma possibilidade para se tentar obter um modelo para a malha de pressão seria modificar os parâmetros do controlador a fim de tornar a ação de controle mais branda, além de se levar em conta no procedimento a equação que descreve o comportamento da válvula. Sendo que estas sugestões podem ser testadas e estudadas em trabalhos futuros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, A. K. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33, 233-271.

AGUIRRE, L. A. Introdução à identificação de Sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. 3. ed. rev. e ampl.. ed. [S.I.: s.n.], 2007.

ANP, http://www.anp.gov.br/petro/legis_biodiesel.asp; acessada em setembro/2010.

ASTM, <http://www.astm.org/Standards/D6751.htm>; acessada em setembro/2010.

COUGHANOWR, D. R.; KOPPEL, L. B. *Análise e Controle de Processos*. 1. ed. Rio de Janeiro. Ed. Guanabara Dois S.A., 1978. 473 p.

FACCIN, F. Abordagem Inovadora no Projeto de Controladores PID. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2004).

GAMBA, Muriell. Produção de Biodiesel através de Catálise Enzimática em Líquido Iônico. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2009).

JULIATO, A. Análise da influência de diferentes misturas de biodiesel no desempenho e emissões de poluentes de um motor diesel agrícola. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (2006).

LJUNG, L.; "*System Identification Toolbox*", The Mathworks, Inc., 1992.

LJUNG, L. *System identification – theory for the user*. 2nd. [S.I.]: Prentice Hall, 1999.

MACHADO, V. C. Planejamento de Perturbações para a Identificação de Modelos

Dinâmicos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2004).

PETERSON, C. L.; HUSTRULID, T. *Biomass and Bioenergy*, 1998, 14, 91-101.

RACOSKI, B. Viabilidade de Aplicação de Malhas Virtuais na Identificação de Sistemas em Malha Fechada. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2009).

SOUZA, S. P. Produção Integrada de Biocombustíveis: Uma Proposta para Reduzir o Uso de Combustível Fóssil no Ciclo de Vida do Etanol de Cana-de-Açúcar. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (2010).