



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

Lício Bruno Ribeiro Rodrigues Romão

Relatório de Estágio Supervisionado

Campina Grande, Paraíba

Junho 2014

Lício Bruno Ribeiro Rodrigues Romão

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório de Estágio com o objetivo de descrever as atividades durante a realização do estágio, de 180 horas, no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle, LIEC, financiado pela ATECEL.

Área de Concentração: Automação de Processos Industriais

Orientador: George Acioli Júnior

Campina Grande, Paraíba

Junho 2014

Lício Bruno Ribeiro Rodrigues Romão

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório de Estágio com o objetivo de descrever as atividades durante a realização do estágio, de 180 horas, no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle, LIEC, financiado pela ATECEL.

7 de julho de 2014

George Acioli Júnior
Orientador

Professor
Avaliador

Campina Grande, Paraíba
Junho 2014

Este trabalho é dedicado a todos que desejam fazer desse um mundo melhor.

Agradecimentos

A Deus por ter me dado saúde e discernimento durante toda minha vida.

Ao meu Pai, Edgar Rodrigues Romão, e a minha Mãe, Edna Ribeiro Rodrigues Romão, pelos ensinamentos proporcionados. Sem eles, certamente, tudo seria muito mais difícil. Agradeço, também, ao meu irmão, Edgar Rodrigues Romão, minha irmã, Maria Marietta de Mello Bisneta e a todos tios, primos, meus avós e avôs (*In Memmorian*).

A minha namorada, Isabela Miranda Gomes, pelo apoio e incentivo durante os momentos mais difíceis.

Aos meu orientador, George Acioli Júnior, pela atenção dada durante o desenvolvimento do trabalho e ao Professor Péricles Rezende Barros.

A ATECEL, pelo apoio financeiro.

E a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação, o meu muito obrigado.

”Ninguém nasce odiando uma pessoa por sua cor de pele ou religião. Pessoas são ensinadas a odiar. E se elas aprendem a odiar, elas podem ser ensinadas a amar.”

- Nelson Mandela

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquemático de uma geração termosolar. Fonte: [?]	13
Figura 2 – Esquemático de um trocador de calor do tipo contato indireto. Fonte: [?]	14
Figura 3 – Trocadores de calor do tipo casco e tubos.	14
Figura 4 – Trocadores de calor do tipo serpentina.	15
Figura 5 – Representação esquemática de um trocador de calor.	16
Figura 6 – Elemento finito usado para a modelagem do trocador de calor.	17
Figura 7 – Velocidade do líquido necessária para manutenção da temperatura de saída igual a 98°C , parte 1.	19
Figura 8 – Velocidade do líquido necessária para manutenção da temperatura de saída igual a 98°C , parte 2.	20
Figura 9 – Diagrama a blocos da implementação do modelo (2.8) no Simulink.	21
Figura 10 – Modelo com aproximação a elementos finitos <i>versus</i> modelo a regime permanente.	22
Figura 11 – Modelo utilizado para aplicação da entrada <i>sweep</i> para a velocidade do líquido.	24
Figura 12 – Resposta do modelo (2.8) devido a uma entrada de frequência crescente e mesma amplitude para velocidade do líquido.	24
Figura 13 – Resposta do modelo (2.8) devido a uma entrada de frequência crescente e mesma amplitude para temperatura do vapor.	25
Figura 14 – Resposta do modelo (2.8) devido a uma entrada de frequência crescente e mesma amplitude para temperatura do líquido.	26
Figura 15 – Resposta do modelo (2.8) com a aplicação de um sinal quadrado na velocidade do líquido.	27
Figura 16 – Diagrama de bode do trocador para suas entradas em diferentes pontos de operação.	29
Figura 17 – Diagrama polo-zero para o modelo linearizado de (2.8) no ponto de operação nominal.	29
Figura 18 – Diagrama a bloco feito no simulink para realização do processo de identificação.	31
Figura 19 – Diagrama de bode do filtro usado na identificação.	31
Figura 20 – Resultados do processo de identificação para o trocador de calor no ponto de operação nominal.	32
Figura 21 – CLP utilizado na implementação do sistema de controle.	33
Figura 22 – Esquema da comunicação OPC com o MatLab.	34
Figura 23 – Diagrama a bloco do sistema de controle.	34

Figura 24 – Diagrama a bloco do sistema de controle usando a comunicação OPC no simulink.	35
Figura 25 – Programa do CLP utilizada para controlador o trocador de calor. . . .	36
Figura 26 – Saída do sistema de controle para os ganhos (4.2)	36
Figura 27 – Resposta do sistema de controle após a modificação dos ganhos do controlador.	37

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do Trocador de Calor	18
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LIEC	Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
OPC	<i>Object Linking and Embedding for Process Control</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
ATECEL	Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	LIEC	12
1.2	ATECEL	12
1.3	Trocador de Calor	12
1.3.1	Trocadores de contato direto versus contato indireto	13
1.3.2	Classificação de acordo com o aspecto construtivo	14
2	MODELAGEM DO TROCADOR	16
3	ESTUDO DO TROCADOR EM MALHA ABERTA	23
3.1	Sinais senoidais com frequência crescente	23
3.2	Onda Quadrada	27
3.3	Identificação do Trocador de Calor	28
4	SISTEMA DE CONTROLE	33
4.1	CLP - Controlador Lógico Programável	33
4.2	OPC - Object Linking and Embedding for Process Control	34
4.3	Descrição do sistema de controle	34
5	CONCLUSÃO	38

1 Introdução

1.1 LIEC

O LIEC, Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle, é um laboratório na UFCG cujo objetivo é realizar pesquisas nas áreas de controle e automação. Atualmente, está sob a direção do Professor Péricles Barros. Recentemente, o laboratório desenvolveu um software para o sintonia de controladores PID que é utilizado nas plataformas da Petrobrás.

Atualmente, existem várias linhas de pesquisas no laboratório, incluindo o desenvolvimento da automação de plantas industriais como controlador de nível e trocador de calor. A primeira planta está em funcionamento, enquanto que a segunda encontra-se em desenvolvimento. Portanto, esse trabalho tem o objetivo de construir meios para auxiliar o desenvolvimento do trocador de calor.

1.2 ATECEL

A ATECEL, Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior, é uma empresa parceira do LIEC cujo objetivo é financiar projetos de pesquisa e extensão, viabilizando o desenvolvimento dessas. Foi fundada por professores da antiga Escolas Politécnica da Universidade Federal da Paraíba (Atualmente, Universidade Federal de Campina Grande), em 1967, e seu nome é uma homenagem ao Professor Ernesto Luiz de Oliveira Júnior.

1.3 Trocador de Calor

Trocador de Calor é um dispositivo responsável por controlar o fluxo térmico entre dispositivos, ou seja, transfere energia térmica de um sistema para sua vizinhança ou entre partes do sistema. Geralmente, são utilizados em refinarias de petróleo, plantas químicas, sistemas de refrigeração, usinas de geração de energia, entre outros. No processo de geração de energia, por exemplo, esse dispositivo é utilizado para realizar a condensação da água, que é necessário para o reaproveitamento de água nesse processo e, conseqüentemente, evitando o desperdício de água [?].

Para ilustrar o que foi dito, observa-se a Figura 1, onde é apresentado um esquemático de uma geração termosolar. Inicialmente, os coletores solares concentram a energia luminosa em tubos, que contêm líquidos no seu interior. Ao serem incididos por energia

luminosa, a temperatura do líquido(óleo) aumenta. Parte do líquido quente é armazenado em câmaras, chamada na figura de pulmão térmico, e parte é enviada para o evaporador. O evaporador será responsável por transferir a energia térmica do líquido para a água, causando a sua evaporação. O evaporador é um trocador de calor e compõe uma peça fundamental nesse processo de geração de energia. O vapor de água da saída do evaporador é utilizado para acionar as turbinas do gerador. Para viabilizar o sistema de geração, é necessário que essa água seja reaproveitada e, por isso, faz-se o uso do segundo trocador de calor do processo, chamado de condensador. O condensador é responsável pelo resfriamento do vapor, transformando-o em líquido (água). A água retorna para o evaporador, fechando o ciclo de geração.

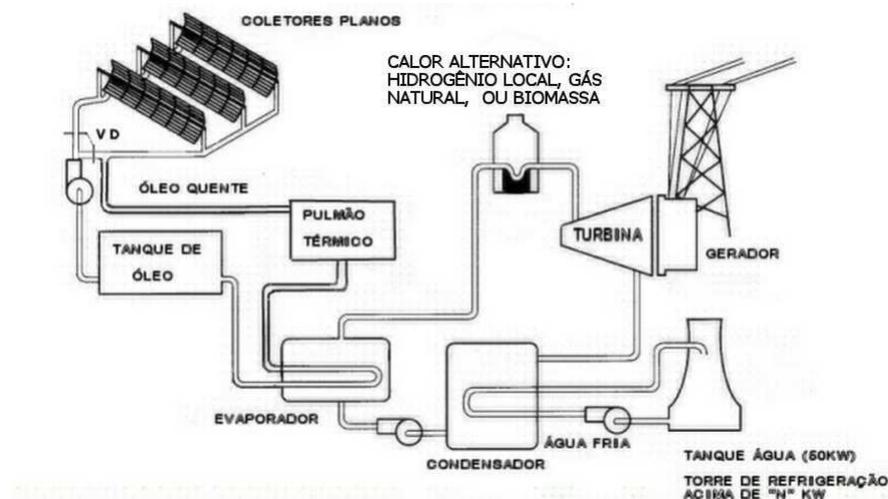


Figura 1 – Esquemático de uma geração termosolar. Fonte: [?]

Os trocadores de calor podem ser classificados de várias maneiras: quanto ao modo de troca de calor; quanto ao número de fluidos envolvidos no processo; quanto ao tipo de construção, entre outras. Para resumir a classificação dos trocadores, considera-se duas classificações: a que divide os trocadores entre aqueles que utilizam o contato direto e indireto e a que classifica-os de acordo com suas características de construção.

1.3.1 Trocadores de contato direto versus contato indireto

A depender de como ocorre a troca de calor em seu interior, os trocadores de calor podem ser classificados em trocadores de contato direto e trocadores de contato indireto. Os primeiros são quando existe contato físico entre as substâncias que trocam calor e, conseqüentemente, sua aplicação está restrita ao caso no qual o contato direto é permissível. Por outro lado, os trocadores de calor do tipo contato indireto são dispositivos onde os fluidos permanecem separados. Na Figura 2, é ilustrado um trocador de calor de contato indireto, onde se utiliza um vapor para transferir energia térmica para um líquido que escoar dentro do tubo em vermelho. Note que não existe contato direto entre o vapor e o líquido.

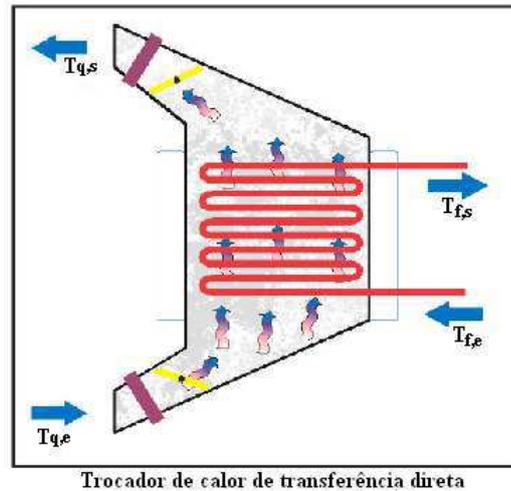


Figura 2 – Esquemático de um trocador de calor do tipo contato indireto. Fonte: [?]

1.3.2 Classificação de acordo com o aspecto construtivo

De acordo com o aspecto construtivo os trocadores de calor podem ser classificados em: trocadores tubular, tipo placa, tipo regenerativo e superfície estendida. Além desses, existem outros tipos. Nesse trabalho, serão descritas apenas dois tipos de trocadores do tipo tabular, são eles: trocador de calor casco e tubos e serpentina.

O trocador de calor do tipo casco e tubos é constituído de tubos e uma carcaça. Nesse tipo de trocador, um dos fluidos passa por dentro da tubulação, e o outro pelo espaço entre a tubulação e sua carcaça. Na Figura 3 estão representadas trocadores de calor do tipo casco tubo, sendo a tubulação ilustrada na Figura 3a, enquanto que na Figura 3b é apresentado um modelo do trocador de calor. São os tipo de trocadores mais comuns de trocadores e estão presentes em indústrias pesadas.



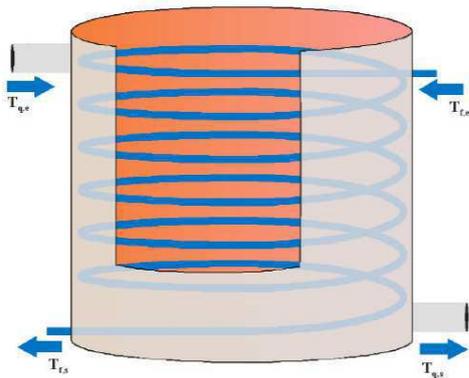
(a) Tubulação de um trocador de calor do tipo casco e tubo. Fonte: [?]



(b) Trocador do tipo casco e tubo industrial. Fonte: [?]

Figura 3 – Trocadores de calor do tipo casco e tubos.

O trocador de calor tubular do tipo serpentina consiste em um tubo circular onde escoe um fluido e fluido externo. A transferência de calor ocorre entre o fluido externo e o fluido interno, um esquemático desse tipo de trocador é apresentado na Figura 4.



(a) Esquemático de um trocador de calor serpentina.

(b) Tubo para um trocador de calor do tipo serpentina. Fonte: [?]

Figura 4 – Trocadores de calor do tipo serpentina.

Contextualizado o principal componente do trabalho (trocador de calor), o desenvolvimento para a construção de um sistema de controle utilizando a tecnologia OPC para um trocador de calor será apresentado da seguinte maneira. Primeiramente, no capítulo 2, será apresentado a modelagem do trocador de calor, ou seja, demonstrar-se-á como obter um modelo matemático para o trocador em estudo e explicitando sua implementação na plataforma Simulink. Em seguida, no capítulo 3, apresenta-se algumas características do modelo levantado no capítulo anterior e ao final usa-se um processo de identificação para a obtenção de um modelo de primeira ordem do trocador. Finalmente, no capítulo 4, é apresentado o sistema de controle desenvolvido para o controle do trocador de calor usando a comunicação OPC.

Este trabalho foi desenvolvido no LIEC, laboratório da UFCG, com o apoio da ATECEL. Alguns detalhes a respeito desses dois institutos serão dados a seguir.

2 Modelagem do Trocador

O trocador de calor é um dispositivo que tem o objetivo de aumentar ou diminuir a temperatura do líquido que se movimenta em seu interior. Basicamente, tem-se um líquido com uma temperatura inicial, T_i , movimentando-se através de um tubo cilíndrico, envolto por uma substância, gás ou líquido, com uma temperatura T_v de maneira que $T_v \neq T_i$, para que haja condições para a transferência de energia para o líquido. Na Figura 5 é ilustrado uma representação esquemática de um trocador de calor da maneira descrita.

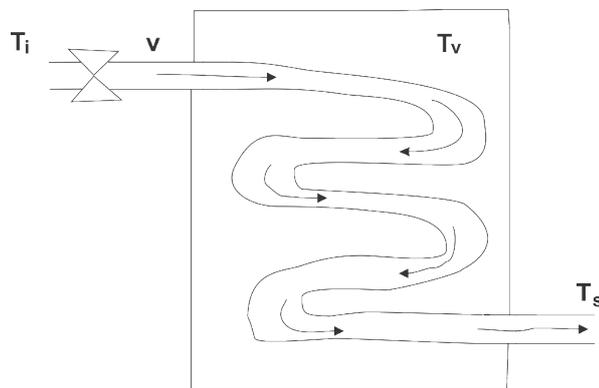


Figura 5 – Representação esquemática de um trocador de calor.

sendo,

T_i - Temperatura, em graus $^{\circ}\text{C}$, do líquido na entrada

T_v - Temperatura, em graus $^{\circ}\text{C}$, do vapor

T_s - Temperatura do líquido, em graus $^{\circ}\text{C}$, na saída do trocador

v - velocidade, em m/s , do líquido na entrada

O trocador estudado nesse trabalho é usado para aumentar a temperatura de um líquido e a substância que envolve a estrutura é o vapor. As condições nominais de operação serão: $T_v = 120^{\circ}\text{C}$, $T_i = 65^{\circ}\text{C}$, $T_s = 98^{\circ}\text{C}$ e $v = 0,31m/s$.

Para a modelagem do trocador de calor, considera-se o elemento diferencial de comprimento dx , ilustrado na Figura 6. A temperatura do líquido que esco no interior do elemento é definida como $\theta_1(t, x)$, enquanto que a temperatura da estrutura metálica que compõe o elemento é definida por $\theta_2(t, x)$. É importante observar que no exterior do elemento existe um vapor com temperatura θ_v .

O modelo dinâmico para esse trocador será obtido com a utilização da lei da conservação da energia. De fato, como a temperatura do vapor é maior que a temperatura do líquido que esco no elemento finito, a energia térmica será transmitida do vapor para o líquido. Essa transferência de energia se dará em duas etapas. Primeiramente a energia

será transferida do vapor para a estrutura metálica que compõe o elemento , em seguida, essa energia será transferida do elemento metálico para o líquido.

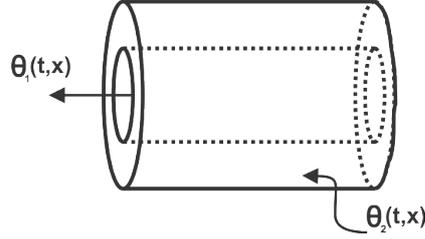


Figura 6 – Elemento finito usado para a modelagem do trocador de calor.

Dito isso, o princípio da conservação de energia será aplicado nas duas etapas descritas anteriormente. O resultado da aplicação desse princípio na primeira etapa resulta na equação (2.1), onde o primeiro termo do lado esquerdo representa a quantidade de energia que o tubo metálico absorve devido a variação de temperatura em seu interior; o segundo termo é a quantidade de energia recebida devido a diferença de temperatura entre o metal e o vapor; o terceiro termo, por seu vez, representa a energia térmica cedida ao líquido devido a diferença de temperatura existente entre o metal e o líquido [?].

$$\mu_2 c_{metal} [\theta_2(t+dt, x) - \theta_2(t, x)] dx + \pi D_2 \alpha_v [\theta_v(t, x) - \theta_2] dt dx - \pi D_1 \alpha_1 [\theta_2(t, x) - \theta_1(t, x)] = 0 \quad (2.1)$$

A aplicação do princípio da conservação de energia na segunda etapa resultada na equação (2.2). O primeiro termo de (2.2) representa a quantidade de energia recebida do tubo metálico devido a diferença de temperatura; o segundo termo indica a energia recebida devido a variação de temperatura no tempo; o terceiro deve-se ao transporte de energia térmica pelo líquido em movimento no interior do tubo [?].

$$\pi D_1 \alpha_1 [\theta_2(t, x) - \theta_1(t, x)] dt dx + \mu_1 c_{liquido} [\theta_1(t+dt, x) - \theta_1(t, x)] dx - v c_{liquido} \mu_1 [\theta_1(t, x+dx) - \theta_1(t, x)] dt = 0 \quad (2.2)$$

As constantes que aparecem nas equações (2.1) e (2.2) tem seus valores definidos na tabela 1. O modelo de equações diferenciais, apresentado na equação (2.3), é obtido a partir dessas com algumas manipulações algébricas. Nesse, a temperatura de saída, T_s , é a temperatura do líquido no último elemento diferencial do trocador de calor.

$$\begin{cases} \tau_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} + \beta(\theta_2 - \theta_1) + \theta_2 - \theta_v = 0 \\ \tau_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial t} + \theta_1 - \theta_2 + \tau_1 v \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = 0 \\ \theta_s = \theta_1(t, L) \end{cases} \quad (2.3)$$

sendo,

Parâmetro	Valor
L	2.44 m
D1	0.0547 m
D2	0.0613 m
α_1	$754 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
α_v	$3510 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
c_{liquido}	$4184 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
c_{metal}	$393.3 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
μ_1	0.223 kg m^{-1}
μ_2	0.532 kg m^{-1}

Tabela 1 – Parâmetros do Trocador de Calor

- $\tau_1 = \frac{\mu_1 c_1}{\pi D_1 \alpha_1}$ e $\tau_2 = \frac{\mu_2 c_2}{\pi D_2 \alpha_v}$ as constantes de tempo do trocador.
- $\beta = \frac{D_1 \alpha_1}{D_2 \alpha_v}$ é um coeficiente adimensional.
- $0 \leq x \leq L$, onde L é o comprimento do percurso no qual a água percorre dentro do trocador.

Devido ao fato de modelo (2.3) ser um sistema de equações diferenciais parciais (não sendo possível a construção de um modelo em espaço de estados finito dimensional), será realizada uma aproximação a elementos finitos. Antes disso, necessita-se de um modelo base para a adequação do modelo a elementos finitos. O modelo base será obtido a partir do comportamento a regime permanente do sistema de equações (2.3). Para sua obtenção, considera-se os termos que contém as derivadas com relação ao tempo nulo e, logo após, resolve-se as equações diferenciais resultantes. Com isso, obtém-se o modelo em regime permanente do perfil de temperatura ao longo do trocador, ilustrado nas equações (2.4) e (2.5).

$$\theta_1 - T_v = e^{-\frac{x}{(\beta+1)v\tau_1}} (T_i - T_v) \quad (2.4)$$

$$\theta_2 = \frac{\beta}{\beta+1} \theta_1 + \frac{T_v}{\beta+1} \quad (2.5)$$

Isolando-se v na equação (2.4), obtém-se:

$$v = \frac{L}{\tau_1(\beta+1)} \frac{1}{\ln\left(\frac{T_i - T_v}{T_s - T_v}\right)} \quad (2.6)$$

O resultado da expressão (2.6) representa o valor da velocidade de entrada do líquido, v , necessária para que a temperatura final tenham um valor especificado, no caso T_s , para diferentes valores de T_v e T_i .

A partir de (2.6) pode-se obter o mapa das perturbações admissíveis, ilustrados nas Figuras 7 e 10, para o mantimento das condições nominais de operação, considerando a seguinte restrição do sinal de entrada: $0 \leq v \leq 0.7m/s$. Na Figura 7a, é apresentado um gráfico em 3D das coordenadas (v, T_i, T_v) de maneira que a temperatura final seja $98^\circ C$, enquanto que nas Figuras 7b, 8a e 8b são ilustradas um corte bidimensional do gráfico apresentado em 7a, sendo a primeira explicitando a temperatura do líquido *versus* a velocidade do líquido na entrada; a segunda a temperatura do vapor *versus* a velocidade do líquido; finalmente, a terceira ilustra o plano das perturbações admissíveis. Com a análises desses resultados, percebe-se que mesmo que as temperaturas T_i e T_v variem, ou seja, $55^\circ C \leq T_i \leq 75^\circ C$ e $105^\circ C \leq T_v \leq 140^\circ C$, é possível manter a temperatura final em $98^\circ C$, apesar da restrição do sinal de entrada.

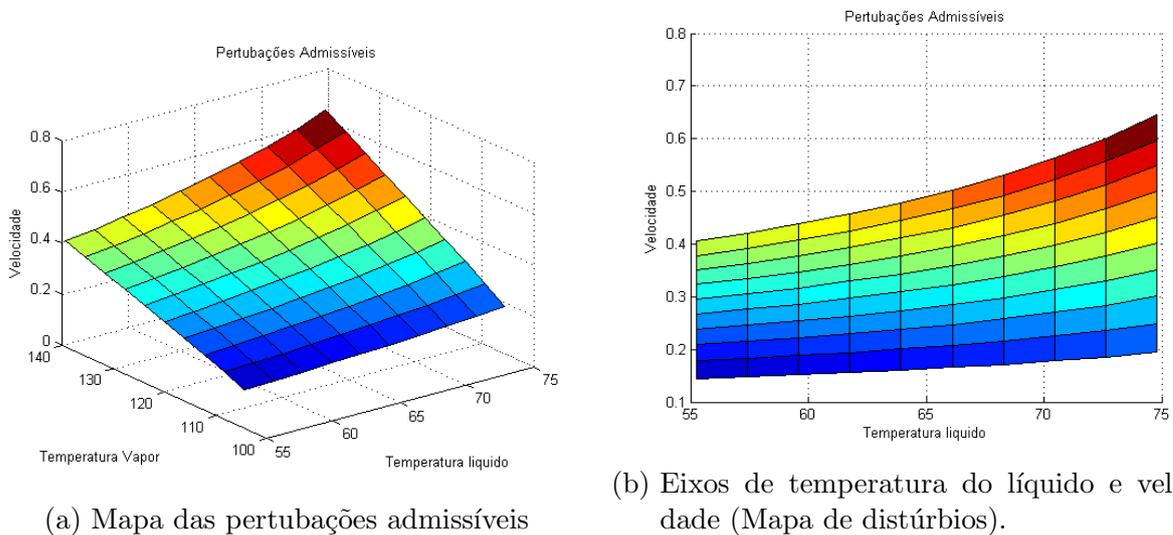
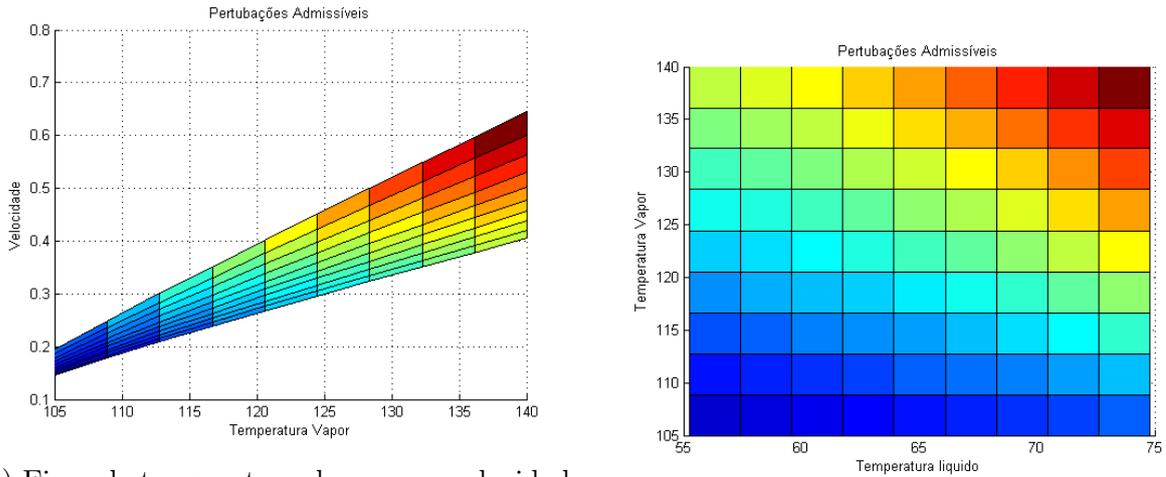


Figura 7 – Velocidade do líquido necessária para manutenção da temperatura de saída igual a $98^\circ C$, parte 1.

Construído o modelo base para o trocador, prossegue-se com o processo de obtenção de um modelo finito-dimensional para o conjunto de equações diferenciais parciais apresentados em (2.3). Para tanto, foi utilizado o método dos elementos finitos aplicado ao modelo (2.3), ou seja, considerou-se N o número de elementos finitos e definiu-se $l = \frac{L}{N}$ o comprimento elementar de cada um desses elementos, adicionalmente, foi definida as temperaturas, para o tubo de metal e o líquido, no início e no fim de cada elemento, sendo o temperatura no início definida com índice menor do que a temperatura no final de cada elemento. Além do índice referente ao elemento, usa-se os índices 1 e 2 para diferenciar a parte do tubo da parte que contém o líquido, sendo o primeiro para o líquido e o segundo para o tubo. A partir disso, substituiu-se os termos em (2.3) que continham as derivadas parciais com relação a x pela seguinte aproximação $\frac{\theta_{1,i} - \theta_{1,i-1}}{l}$ obtendo o seguinte modelo



(a) Eixos de temperatura do vapor e velocidade (Mapa de distúrbios).

(b) Região Admissível para as perturbações.

Figura 8 – Velocidade do líquido necessária para manutenção da temperatura de saída igual a $98^{\circ}C$, parte 2.

a elementos finitos:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{1,i}}{dx} = \left(-\frac{v}{l} - \frac{1}{\tau_1}\right)\theta_{1,i} + \frac{v}{l}\theta_{1,i-1} + \frac{1}{\tau_2}\theta_v \\ \frac{d\theta_{2,i}}{dx} = -\frac{\beta+1}{\tau_2}\theta_{2,i} + \frac{\beta}{\tau_2}\theta_{1,i} + \frac{1}{\tau_2}\theta_v \end{cases} \quad i = 1, \dots, N \quad (2.7)$$

Expandindo o modelo (2.7) na forma matricial, obtém-se:

$$\dot{\theta} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\tau_1} - \frac{v}{l} & \dots & 0 & \frac{1}{\tau_1} & \dots & 0 & 0 \\ \frac{v}{l} & \ddots & 0 & 0 & \ddots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & -\frac{1}{\tau_1} - \frac{v}{l} & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{\tau_1} \\ \frac{\beta}{\tau_2} & \dots & 0 & 0 & -\frac{(\beta+1)}{\tau_2} & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \dots & 0 & 0 & \ddots & \dots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\beta}{\tau_2} & 0 & \dots & 0 & -\frac{(\beta+1)}{\tau_2} \end{pmatrix} \theta + \begin{pmatrix} \frac{1}{l}\theta_{li} \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} v + \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \frac{1}{\tau_2} \\ \vdots \\ \frac{1}{\tau_2} \end{pmatrix} \theta_v \quad (2.8)$$

Com a finalidade de se construir um modelo simulado do trocador de calor, o modelo em espaço de estados (2.8) foi implementado no Simulink. O diagrama a blocos desse sistema é apresentado na Figura 9, onde está representado (na parte superior) o trocador de calor com suas três entradas (temperatura do líquido na entrada, velocidade do líquido na entrada e a temperatura do vapor que envolve a estrutura) e uma saída. Em sua parte inferior, tem-se o diagrama a blocos da estrutura, onde o bloco em verde implementa o modelo (2.8) e o bloco em vermelho representa a dinâmica, de 1s, do sensor de temperatura.

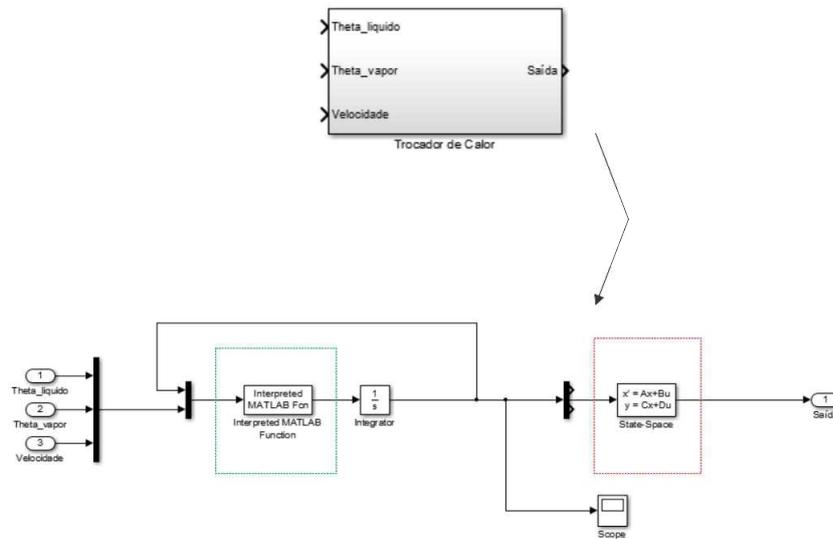


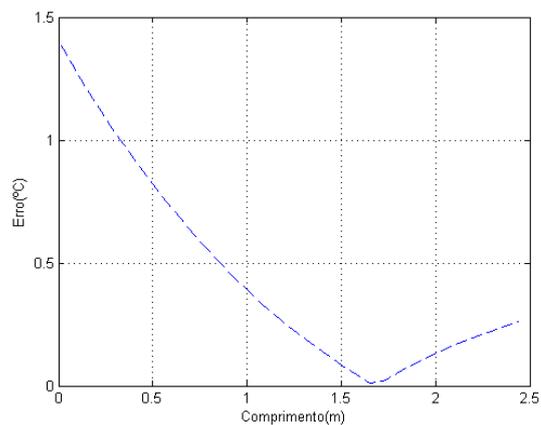
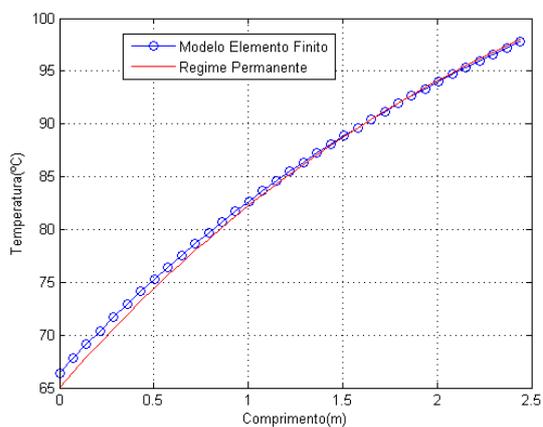
Figura 9 – Diagrama a blocos da implementação do modelo (2.8) no Simulink.

Da forma na qual foi apresentado o modelo a elementos finito, faz-se necessário um mecanismo para a definição do número de elementos, N . Por esse motivo, definiu-se, anteriormente, um modelo base em regime permanente. Dessa forma, o número de elementos será definido de maneira que a diferença entre a temperatura final do líquido, $\theta_{1,N}$, e $98^\circ C$ seja menor que $0.5^\circ C$ quando as três entradas do trocador são aquelas nominais ($T_i = 65^\circ C$, $T_v = 120^\circ C$ e $v = 0,31 m/s$), isto é:

$$|\theta_{1,N} - 98^\circ C| \leq 0,5^\circ C \quad (2.9)$$

Dito isso, aumentando gradativamente o número de elementos finito até que a condição (2.9) fosse satisfeita, foi obtido $N = 35$. Na Figura 10a é ilustrada a comparação entre as respostas do modelo (2.7) para $N = 35$ (em azul), e do modelo a regime permanente (em vermelho), (2.6), onde se percebe a semelhança entre as respostas. Para maior clareza, na Figura 10b, é apresentado o erro entre as respostas para cada elemento finito, percebendo que para $x = 2,44$ (comprimento do trocador) o valor de erro satisfaz a condição (2.9).

Caracterizado o modelo do trocador em estudo, no próximo capítulo, serão demonstradas algumas respostas do modelo implementado em malha aberta, com a finalidade de adquirir conhecimentos a respeito de suas não linearidades e dinâmica.



- (a) Comparação entre as respostas entre o modelo a elemento finito, com $N = 35$, e o modelo (2.6). (b) Erro entre as respostas do modelo a elemento finito e o modelo (2.6).

Figura 10 – Modelo com aproximação a elementos finitos *versus* modelo a regime permanente.

3 Estudo do Trocador em malha aberta

Com o modelo do trocador apresentado na equação (2.8) cuja implementação é ilustrada na Figura 9, para $N = 35$, prosseguiu-se a análise desse em malha aberta. Os teste de malha aberta realizados foram: introdução de um sinal senoidal com frequência crescente de mesma amplitude (termo em inglês chamado *sweep*) para as três entradas; aplicação de um sinal de onda quadrada com frequência oportuna, com o objetivo de identificar as constantes de tempo de subida e de descida e, por final, linearização do modelo em torno de pontos pertencentes ao mapa de perturbações definido no capítulo 2. Todos os testes de malha aberta são explicitados nos parágrafos seguintes.

3.1 Sinais senoidais com frequência crescente

Com foi dito no parágrafo anterior, sinais senoidais com mesma amplitude e frequência crescente são aplicados nas entradas do trocador (temperatura do líquido, temperatura do vapor e velocidade do líquido) separadamente, enquanto as demais são mantidas constantes. Os valores das três entradas são mantidos em seu valor nominal $(T_v, T_i, v) = (120^\circ C, 65^\circ C, 0, 31m/s)$ e introduz-se um sinal senoidal de frequência crescente com nível DC igual ao da respectiva entrada separadamente, enquanto que as demais são mantidas constantes, e observa-se a resposta do modelo (como se pode observar na Figura LL para o caso do sweep na velocidade, v). Nas Figuras 12, 13 e 14 são apresentadas as respostas do modelo (à direita) para o respectivo sinal de entrada (à esquerda). Em 14a, 13a e 12a são apresentadas os sinais aplicados as entradas v , T_i e T_v . Em 12b, 13b e 14b são ilustradas suas respectivas respostas. Nas Figuras 12c e 13c, fez-se um zoom na resposta do sistema com o objetivo de se analisar o efeito de atenuação do sinal, na medida em que a frequência do sinal de entrada aumenta. Observa-se que para a Figura 14b o valor da resposta não apresentada oscilações, o motivo desse comportamento é devido ao atraso de propagação do calor dentro do trocador, como será confirmado adiante com a apresentação diagrama de bode para essa entrada. Fisicamente, o atraso de propagação da temperatura de entrada, T_i , para a temperatura de saída, T_s , é devido ao fato da necessidade de propagação da energia térmica entre os elementos finitos do modelo do trocador.

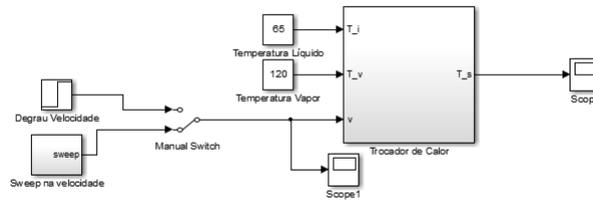
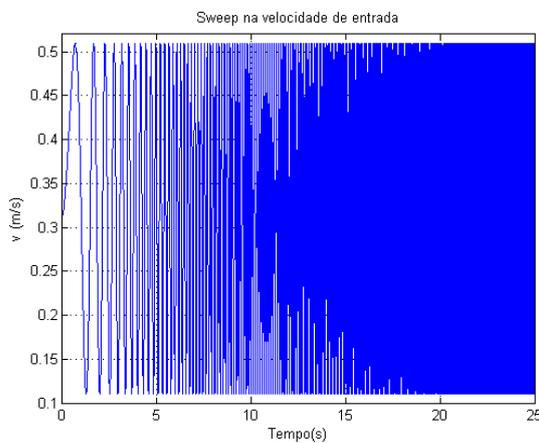
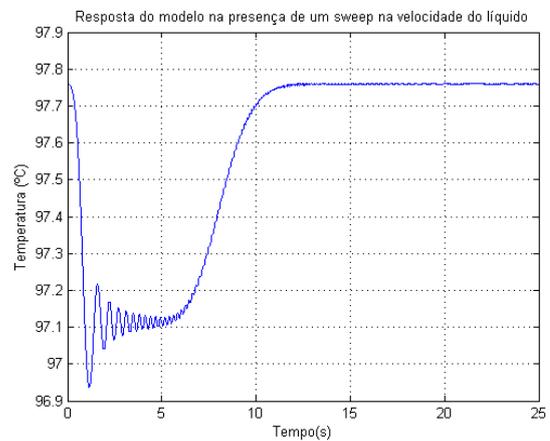


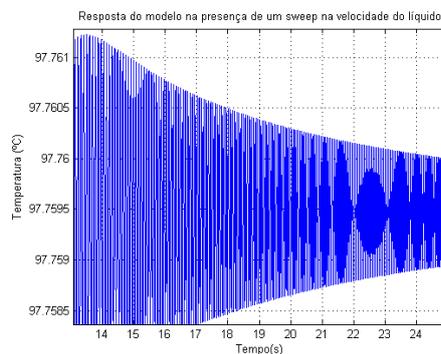
Figura 11 – Modelo utilizado para aplicação da entrada *sweep* para a velocidade do líquido.



(a) Sinal de entrada (*sweep*) na velocidade do líquido, mantendo as outras entradas constantes.

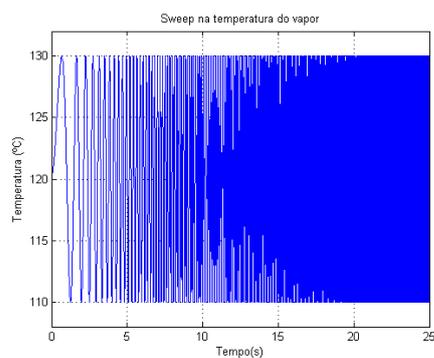


(b) Resposta do modelo do trocador devido a entrada a direita.

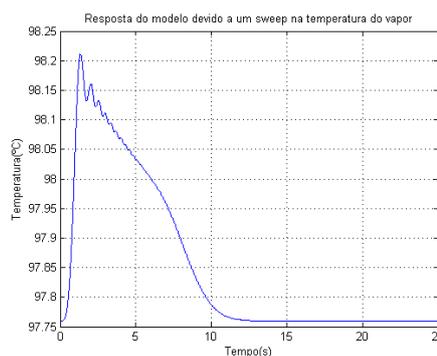


(c) Zoom da resposta do sistema indicando a atenuação do sinal quando a frequência aumenta.

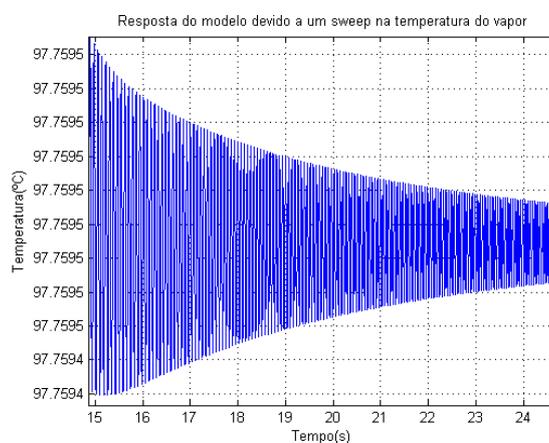
Figura 12 – Resposta do modelo (2.8) devido a uma entrada de frequência crescente e mesma amplitude para velocidade do líquido.



(a) Sinal de entrada (sweep) na temperatura do vapor, mantendo as outras entradas constantes.

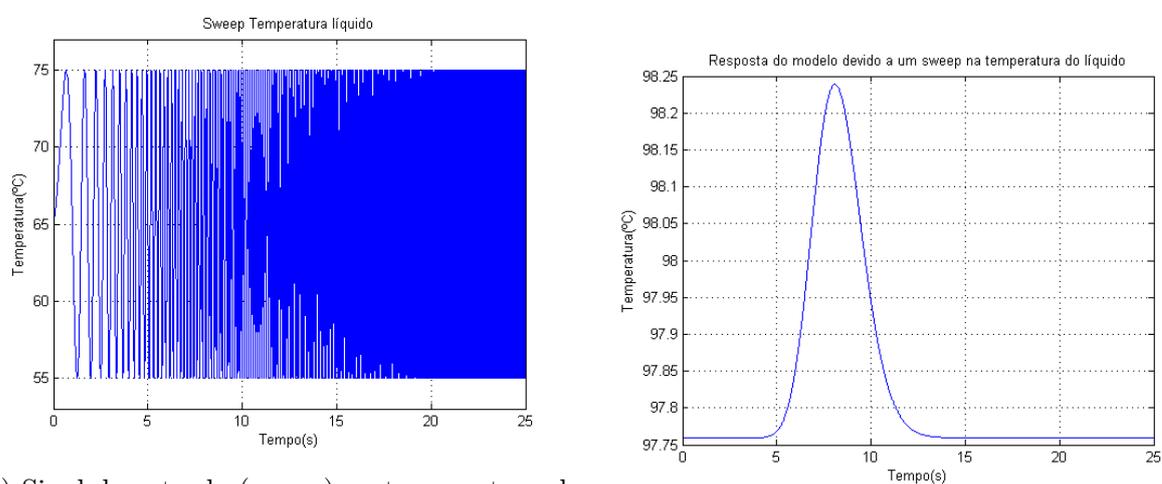


(b) Resposta do modelo do trocador devido a entrada a direita.



(c) Zoom da resposta do sistema indicando a atenuação do sinal quando a frequência aumenta.

Figura 13 – Resposta do modelo (2.8) devido a uma entrada de frequência crescente e mesma amplitude para temperatura do vapor.



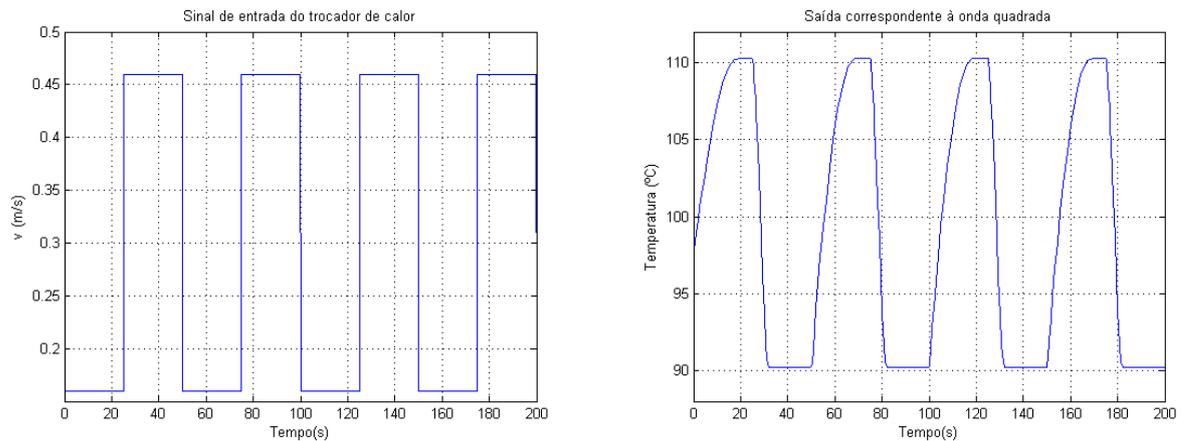
- (a) Sinal de entrada (sweep) na temperatura do líquido, mantendo as outras entradas constantes. (b) Resposta do modelo do trocador devido a entrada a direita.

Figura 14 – Resposta do modelo (2.8) devido a uma entrada de frequência crescente e mesma amplitude para temperatura do líquido.

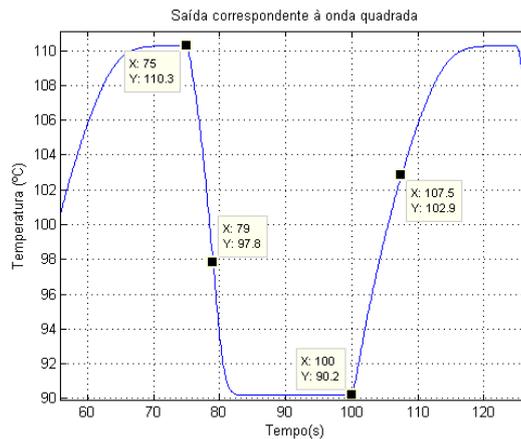
3.2 Onda Quadrada

Com a finalidade de se analisar as constantes de tempo do sistema, aplica-se um sinal quadrado de frequência 0,02 Hz, amplitude 0,15 m/s e nível DC 0,31 m/s a velocidade do líquido (pois essa será a variável de controle).

Os resultados desse experimento são apresentados na Figura 15. Na Figura 15a, apresenta-se o sinal de onda quadrada aplicado na entrada do trocador, enquanto que na Figura 15b é apresentada sua respectiva resposta.



(a) Sinal quadrado aplicado na velocidade do líquido. (b) Saída do modelo correspondente ao sinal de quadrado.



(c) Zoom da resposta do sistema, identificando os pontos utilizados na validação das constantes de tempo de subida e descida.

Figura 15 – Resposta do modelo (2.8) com a aplicação de um sinal quadrado na velocidade do líquido.

Observando-se a Figura 15b, percebe-se que as constantes de tempo de subida e descida do trocador são diferentes (devido às não linearidades), de fato, os valores dessas

podem ser calculados a partir dos pontos especificados na Figura 15c (pois representam 63% da variação total durante os transitórios). Dessa forma, definindo o tempo de subida e descida como T_{sub} e T_{des} , respectivamente, tem-se:

$$T_{des} = 79 - 75 = 4 \text{ s} \quad (3.1)$$

$$T_{sub} = 100 - 107,5 = 7,5 \text{ s} \quad (3.2)$$

Com os valores obtidos em (3.1) e (3.2), conclui-se que T_{sub} é 87% maior que T_{des} .

A seguir, será demonstrado o processo utilizado para a obtenção de um modelo de primeira ordem para o processo usando o algoritmo dos mínimos quadrados.

3.3 Identificação do Trocador de Calor

A justificativa para a utilização de um processo de identificação é dada observando a complexidade do modelo (2.8). De fato, algumas de suas características são explicitadas a seguir:

- **Modelo não linear:** Complicação no momento do projeto do controlador (necessidade de técnicas de projeto de controladores para sistemas não lineares). Além das dificuldades apresentadas, sabe-se que um sistema não linear pode ser representados por infinitos sistemas dinâmicos lineares (um para cada ponto de operação) a partir do processo de linearização.

Para ilustrar essa situação, foi realizada a linearização do modelo (2.8) em torno dos seguintes pontos de operação, (T_i, T_v, v) : (55,25, 140, 0,405), (55,25, 105, 0,145), (74,75, 140, 0,6454), (74,75, 105, 0,1943) e (65, 120, 0,31) prosseguindo com a comparação entre os diagramas de bode para cada entrada. Esse resultado é apresentada na Figura 16.

- **Número de polos e zeros:** Da forma na qual foi definido o modelo no capítulo 2, com $N = 35$, sua linearização em seu ponto de operação nominal é um sistema dinâmico de ordem 70. A título de ilustração, observa-se a Figura 17, onde é ilustrado seu diagrama polo-zero.

Apresentada a justificativa para a identificação, seguir-se-á com a descrição do processo de identificação para o trocador de calor. Como todo processo de identificação é caracterizado por seu algoritmo, incia-se com uma descrição breve do algoritmo utilizado que é o algoritmo dos mínimos quadrados.

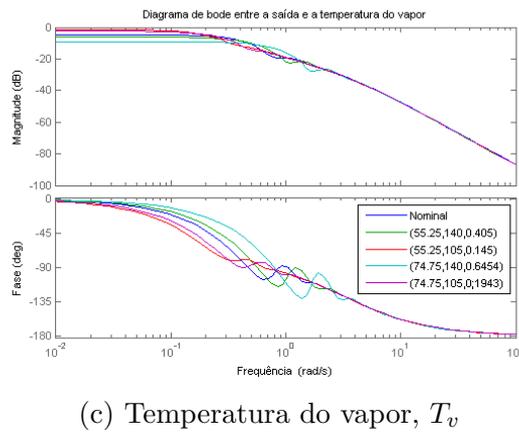
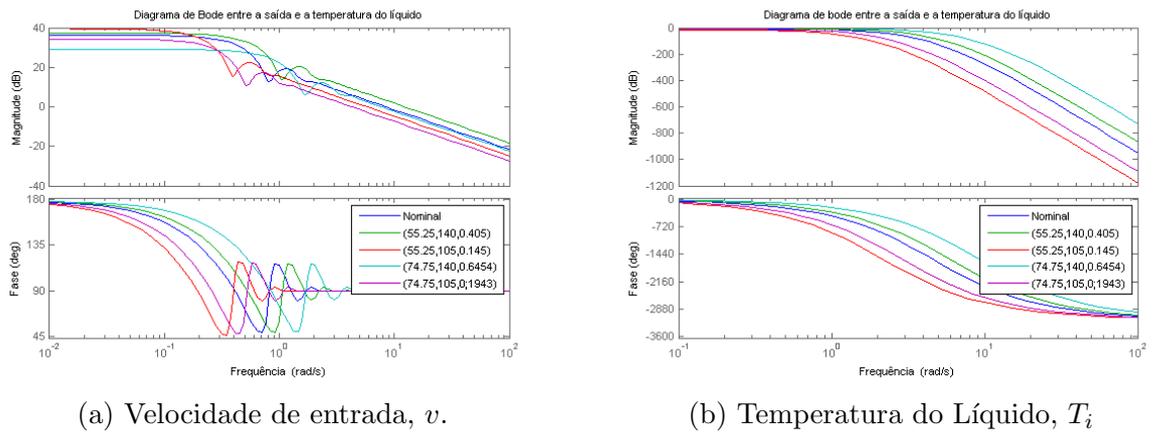


Figura 16 – Diagrama de bode do trocador para suas entradas em diferentes pontos de operação.

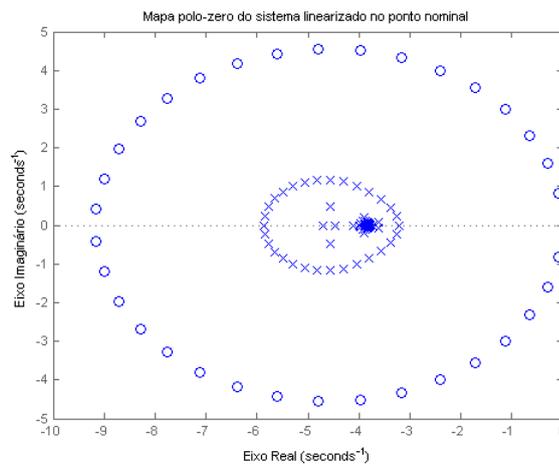


Figura 17 – Diagrama polo-zero para o modelo linearizado de (2.8) no ponto de operação nominal.

O algoritmo dos mínimos quadrados é obtido a partir da minimização da função de custo

$$J_N(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N (y(t) - \phi(t-1)^T \theta)^2 + \frac{1}{2} (\theta - \hat{\theta}(0))^T P_0^{-1} (\theta - \hat{\theta}(0)) \quad (3.3)$$

que resulta no seguinte algoritmo recursivo:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{P(t-2)\phi(t-1)}{1 + \phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)} [y(t) - \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t-1)] \quad (3.4)$$

$$P(t-1) = P(t-2) + \frac{P(t-2)\phi(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)}{1 + \phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)} \quad (3.5)$$

Sendo $\hat{\theta}(t)$ a estimativa do instante de tempo t de dimensão igual a $1 \times N$, onde N é o número de parâmetros; $P(t)$ é uma matriz de dimensão $N \times N$ calculada recursivamente na expressão (3.5); $\phi(t-1)$ representa as medições de $u(t)$ e $y(t)$ até o instante t , onde $u(t)$ e $y(t)$ representam a entrada e a saída do processo, respectivamente. No caso do trocador, como a variável de controle é a velocidade, o vetor $u(t)$ são medições de velocidade enquanto que $y(t)$ são as medições da temperatura de saída.

Se o leitor não tiver familiaridade com o algoritmo dos mínimos quadrados apresentado em (3.4) e (3.5), recomenda-se a leitura de [?] ou [?].

O processo de identificação foi implementado no Simulink, cujo diagrama é ilustrado na Figura 18, sendo o subsistema à direita o modelo do trocador de calor (já explicitado anteriormente) e aquele à esquerda o bloco que implementa as equações (3.4) e (3.5). Como o objetivo é identificar um modelo para o processo em seu ponto de operação nominal, faz-se, primeiramente, com que o sistema atinja o estado de equilíbrio ($v = 0,31 \text{ m/s}$ e $T_f = 97,76^\circ \text{C}$) e, em seguida, aplica-se um sinal de controle quadrado com amplitude $0,01 \text{ m/s}$ e frequência igual a $0,033 \text{ Hz}$, que representa o inverso da maior constante de tempo (tempo de subida) multiplicado por 4. O bloco *step* no subsistema que implementa o algoritmo de estimação é responsável por "ligar" o algoritmo após um intervalo de 15 s (tempo para que o sistema atinja o equilíbrio).

A diferença entre o valor nominal e o valor da saída é aplicada na entrada de um filtro passa-faixa, bem como o sinal de onda quadrada inserido na entrada. Esse filtro é caracterizado pelas seguintes frequências de corte: $\omega_{c1} = 0,05 \text{ Hz}$ e $\omega_{c2} = 1 \text{ Hz}$. Essas são escolhidas de maneira que as dinâmicas do sistema (subida e descida) estejam dentro de sua banda de passagem. Na Figura 19 é ilustrado o diagrama de bode do filtro utilizado, onde os dois pontos representam as frequências de corte ω_{c1} e ω_{c2} . Apenas após a filtragem, os sinais de entrada e saída são utilizados no processo de identificação.

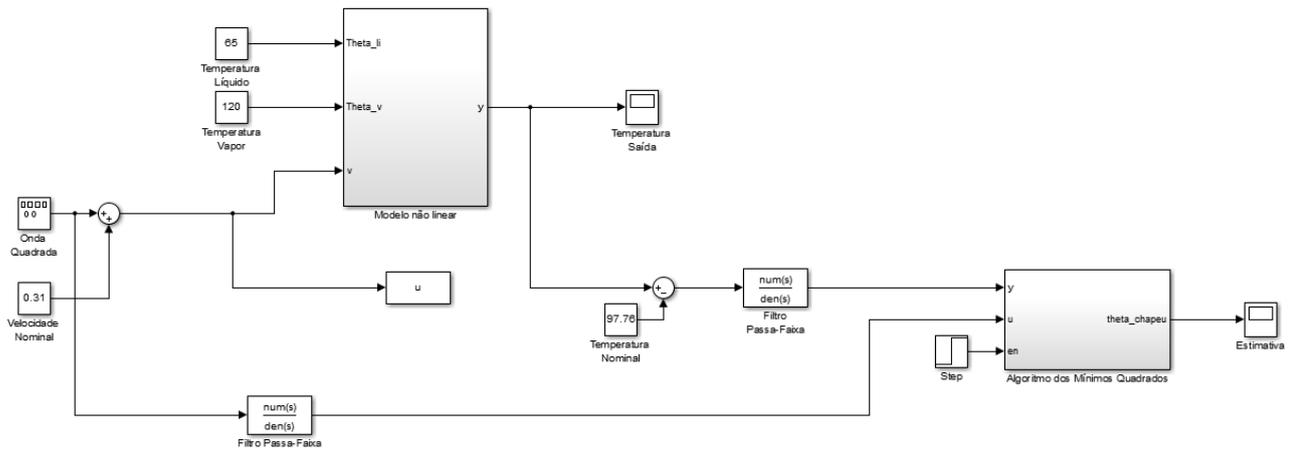


Figura 18 – Diagrama a bloco feito no simulink para realização do processo de identificação.

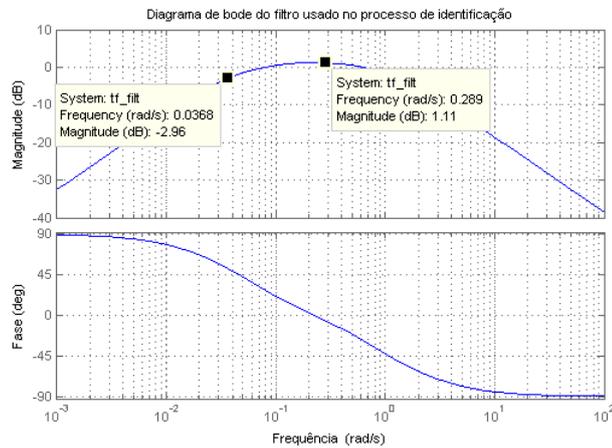


Figura 19 – Diagrama de bode do filtro usado na identificação.

O modelo utilizado para identificação é apresentado na equação (3.6), ou seja, interessa-se numa aproximação de primeira ordem do trocador de calor. Como se pode observar, o modelo contém dois parâmetros, são eles: b_0 e a_1 .

$$\frac{T_s(t)}{v(t)} = \frac{b_0 q^{-1}}{a_1 q^{-1} + 1} \quad (3.6)$$

Os resultados obtidos no processo de identificação são apresentados na Figura 20. Na Figura 20a é ilustrado o sinal de controle usado na identificação (observe que a variação em torno de 0,31 m/s é pequena pois se deseja obter um modelo para o ponto de operação nominal) e a sua respectiva saída, ilustrada na Figura 20b. Na Figura 20c é apresentado o resultado do algoritmo dos mínimos quadrados, onde o parâmetro b_0 está ilustrado em verde, enquanto que a_1 é demonstrado em azul.

Ao final desse capítulo, foi obtido um modelo de primeira ordem para o trocador de calor usando o algoritmo dos mínimos quadrados. Além disso, foram analisadas carac-

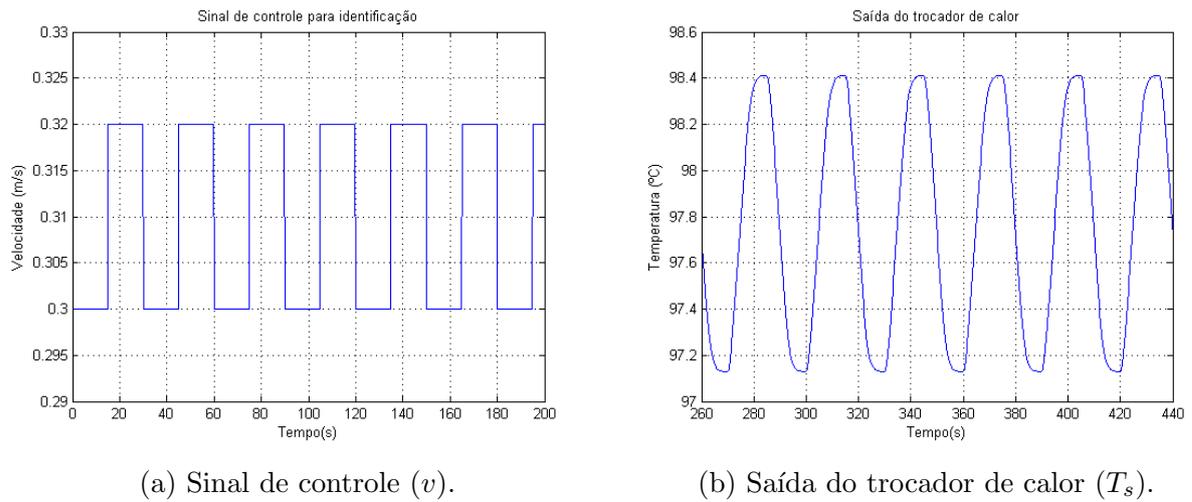
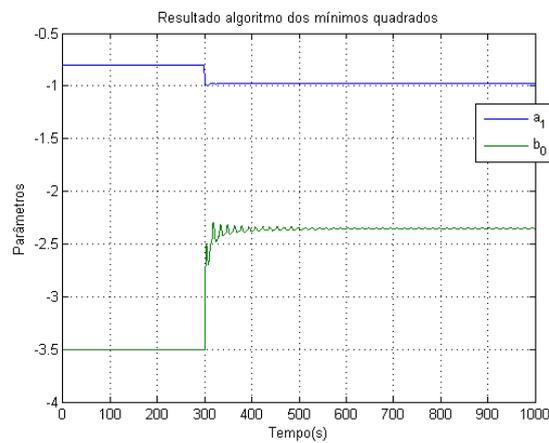
(a) Sinal de controle (v).(b) Saída do trocador de calor (T_s).(c) Parâmetros estimados b_0 (verde) e a_1 (azul).

Figura 20 – Resultados do processo de identificação para o trocador de calor no ponto de operação nominal.

terísticas intrínseca ao modelo (2.8) implementado no ambiente Simulink. Feito isso, no próximo capítulo, será descrito o sistema de controle implementado utilizando o CLP e a tecnologia OPC.

4 Sistema de Controle

Neste capítulo será apresentado o sistema de controle construído a partir do modelo de primeira ordem, obtido no capítulo anterior. Antes de prosseguirmos com a descrição do sistema de controle e a maneira na qual este foi obtido, serão introduzidos brevemente alguns de seus componentes essenciais, que são: CLP (Controlador Lógico Programável) e OPC (do inglês, *Object Linking and Embedding for Process Control*).

4.1 CLP - Controlador Lógico Programável

O CLP é um microprocessador utilizado para aplicações industriais, devido a sua adequação para ambientes fabris. Apresentam entradas e saídas analógicas e digitais e sua programação é feita utilizando a linguagem ladder. Esse tipo de linguagem é adequado para a construção de sistemas lógicos sendo, portanto, adequado para as aplicações industriais. Além da possibilidade de implementação de funções lógicas, alguns desses dispositivos possuem a capacidade para a implementação de função de controle, como o controlador PID.

Dentre os diversos fabricantes de CLP, foi utilizado os controlador CompactLogix L32E, da Allen-Bradley. O software utilizado para a sua programação é o RSLogix5000, fornecido pela Rockwell. Na Figura 21 é apresentada a plataforma com o controlador utilizado. Como a implementação feita nesse trabalho foi feita usando a comunicação OPC (que será descrita a seguir), não foi utilizado nenhum módulo para entradas digitais ou analógicas.



Figura 21 – CLP utilizado na implementação do sistema de controle.

4.2 OPC - *Object Linking and Embedding for Process Control*

OPC (OLE para controle de processos) é um conjunto de protocolos de comunicação industrial especialmente desenvolvido para possibilitar o alto grau de interoperabilidade entre os dispositivos de diferentes fabricantes, dispensando a necessidade de drivers específicos para cada aplicação.

Toda a comunicação entre o CLP, e o Matlab foi feita usando essa tecnologia. O esquemático da comunicação OPC é apresentado na Figura 22.



Figura 22 – Esquema da comunicação OPC com o MatLab.

4.3 Descrição do sistema de controle

O diagrama a bloco do sistema de controle é apresentado na Figura 23. Como foi dito anteriormente, a variável de controle é a velocidade de entrada do líquido, portanto, os valores das entradas T_i e T_v são mantida constantes e iguais a $65^\circ C$ e $120^\circ C$, respectivamente.

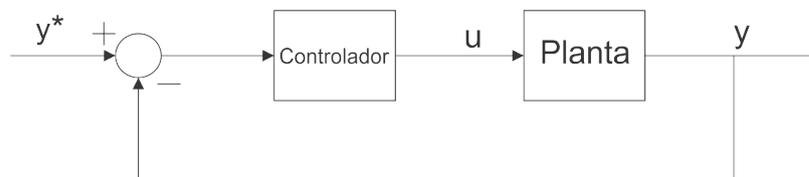


Figura 23 – Diagrama a bloco do sistema de controle.

Para a implementação do Simulink e a utilização da comunicação OPC entre o CLP e o MatLab, usou-se os blocos Read OPC e Write OPC, contidos na biblioteca OPC toolbox, no Simulink. Observando a Figura 22, percebe-se a necessidade de uma servidor OPC para intermediar a comunicação entre o CLP e o MatLab, para tanto, usa-se o servidor RSLinx Classic, fornecido pelo fabricante do CLP. Dessa forma, para a construção do sistema, segue-se os seguintes passos: primeiramente, configura-se o servidor OPC usando o software RSLinx; uma vez configurado, conecta-se o MatLab ao servidor usando o bloco OPC configuration, também pertencente ao toolbox OPC.

Feita a configuração do MatLab, é possível o intercâmbio de informações entre o MatLab e o CLP. O diagrama do sistema de controle que utiliza a comunicação OPC no simulink é apresentado na Figura 24, onde os valores dos ganhos do controlador $-K_p$ e K_i , o tempo de simulação (representado pela variável Tempo), a temperatura de saída (variável PV) e a variável Enable, cuja função será explicitada a seguir, são passadas para

o CLP. Por outro lado, a variável CV (que representa a saída do controlador) é lida do CLP.

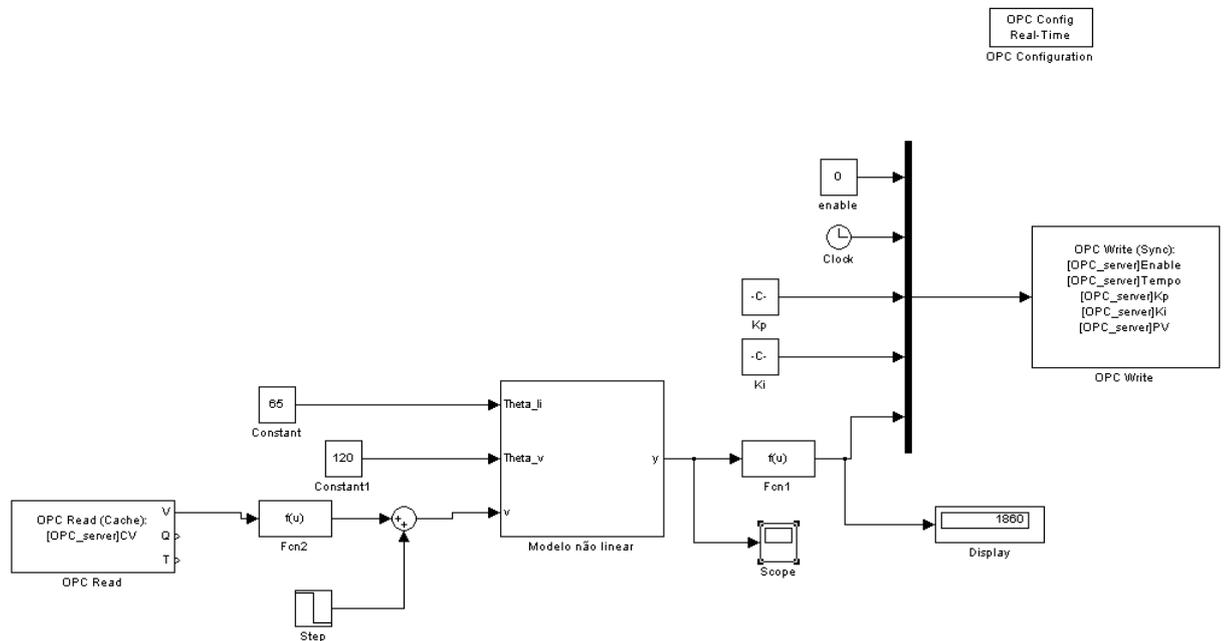


Figura 24 – Diagrama a bloco do sistema de controle usando a comunicação OPC no simulink.

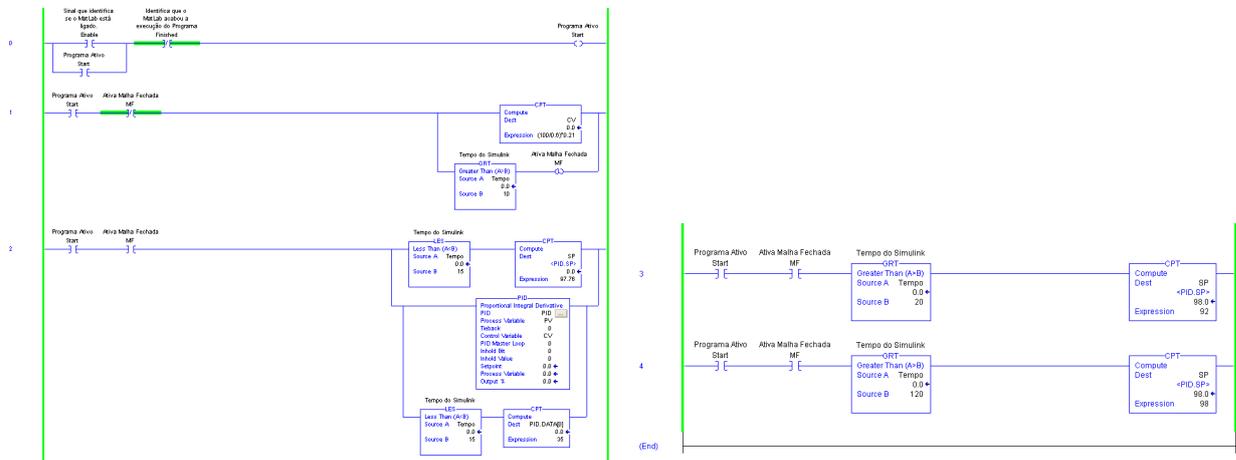
O cálculo dos parâmetros do controlador PID são obtidos com o procedimento descrito em [?], tomando como base o modelo de primeira ordem obtido no capítulo anterior. A equação paramétrica do controlador PID usada é explicitada na equação (4.1) e os valores dos parâmetros são apresentados em (4.2).

$$u(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) e(s) \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} K_p &= -0.05 \\ K_i &= -0.0475 \\ K_d &= 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

O programa do CLP responsável pelo controle do trocador de calor é ilustrado na Figura 25. A primeira linha do programa, indicada com o número zero, executa a ativação do flag Start, se a variável Enable estiver ativa (essa variável assume valor um, toda vez que a simulação no MatLab é executada). O linha 1 atribui o valor de CV igual a 35 (valor que quando transformado gera um sinal de controle de maneira que a saída do trocador seja $98^\circ C$), se o flag MF fechada não estiver ativo e o flag Start estiver ativo. Nessa mesma linha tempo um comparador que ativa o flag MF quando o Tempo de simulação (tempo

passado do simulink) for maior que 10 segundos. Após a ativação de MF (feita na linha anterior), o controlador PID entra em ação, mantendo o SP igual a $97,76^{\circ}C$. A linha 3 muda o SP do controlador PID para $92^{\circ}C$ quando o tempo de simulação é maior que 20 segundos. Na última linha do programa, o SP é alterado para $98^{\circ}C$ em $t = 120$ s.



(a) Primeira parte do programa do CLP.

(b) Segunda parte do programa do CLP.

Figura 25 – Programa do CLP utilizada para controlar o trocador de calor.

Além das mudanças no valor do SP feitos no programa do CLP, introduz uma perturbação de amplitude $-0,1$ m/s no sinal de controle no instante $t = 70$ segundos. No momento da inserção da perturbação no sinal de controle o valor de SP é $92^{\circ}C$. A saída do sistema de controle para os ganhos apresentados em (4.2) é ilustrada na Figura 26.

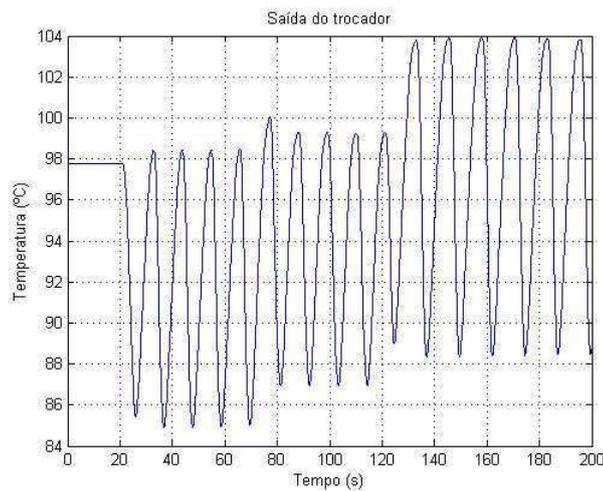


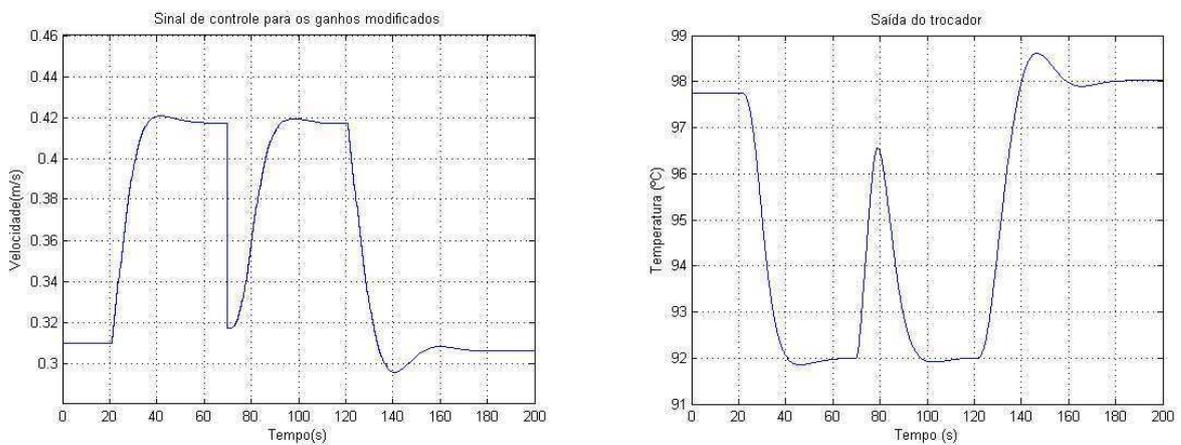
Figura 26 – Saída do sistema de controle para os ganhos (4.2)

Devido a grande oscilação presente na saída do sistema, diminui-se os ganhos do

controlador para os seguintes valores:

$$\begin{aligned} K_p^{mod} &= 0.001K_p \\ K_i^{mod} &= 0.005K_i \\ K_d &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

com K_p e K_i dados em (4.2). Os resultados da saída e do sinal de controle após as modificações nos parâmetros do controlador são ilustrados na Figura 27. Ao contrário do ocorrido com os ganhos iniciais, a resposta do sistema complexidade apresenta oscilações aceitáveis. Dessa forma, foi alcançado o objetivo inicial do trabalho que era a construção de um sistema de controle simulado utilizando a comunicação OPC no ambiente do MatLab.



- (a) Sinal de controle do sistema após a modificação dos ganhos do controlador. (b) Saída do sistema de controle após a modificação dos ganhos do controlador.

Figura 27 – Resposta do sistema de controle após a modificação dos ganhos do controlador.

5 Conclusão

Este trabalho consistiu no projeto de um sistema de controle para um trocador de calor usando a comunicação OPC. No primeiro capítulo, foi abordado a motivação do trabalho, apresentando aplicações do trocador de calor em um sistema de geração termosolar. Em seguida, foi discutido a modelagem do trocador de calor e a sua implementação no simulink, criando uma aproximação a elementos finitos para um sistema de equações diferenciais parciais. Posteriormente, estabelecido o modelo para o trocador de calor, foram feitas análises do comportamento em malha aberta como: resposta um sinal senoidal com frequência crescente e a resposta a um sinal quadrado, para a validação das constantes de tempo de subida e de descida. Ao final, foi realizado um processo de identificação com a finalidade de se obter um modelo de primeira ordem no ponto de operação nominal. Finalmente, no capítulo 4, foi apresentado o sistema de controle que utiliza um controlador PI e a comunicação OPC no controle do trocador. Durante o desenvolvimento desse trabalho, foi realizado o estudo sobre a tecnologia de comunicação OPC, muito importante na construção de plantas industriais, além da consolidação com da programação com o CLP. O ponto positivo foi a estrutura do laboratório (possuindo um sala com um CLP interligado em rede aos computadores); o apoio do colegas, sempre tirando dúvidas. Como pontos negativos destaco o pouco tempo de trabalho (cerca de um mês e meio) e a falta de experiência com a tecnologia utilizada. Durante a fase de desenvolvimento, necessitou-se dos conhecimentos das disciplinas de controle analógico e digital, bem como o estudo de técnicas adaptativas para a utilização do algoritmo dos mínimos quadrados no processo de identificação.

De uma forma geral, os conhecimentos adquiridos durante a execução desse trabalho será muito útil no seguimento na minha carreira profissional, uma vez que a comunicação OPC é amplamente utilizada nas indústrias como, por exemplo, a indústria petroquímica.