DENIS FAVA CERCHIARO

**CONTROLE DE TEMPERATURA DE UM
TROCADOR DE CALOR**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
2006

DENIS FAVA CERCHIARO

**CONTROLE DE TEMPERATURA DE UM
TROCADOR DE CALOR**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas

Orientador:
Prof. Dr. Fuad Kassab Júnior

São Paulo

2006

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Maria Amélia e Roberto que me apoiaram
com todo o seu amor e me ensinaram as mais importantes lições de vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde, sabedoria e força para vencer este desafio e realizar esta grande conquista.

Ao professor Fuad Kassab Júnior pela sua amizade, motivação e orientação precisa no desenvolvimento deste trabalho. Com ele aprendi além de lições acadêmicas.

Ao professor Francisco Lacaz de Moraes Vieira do Laboratório de Biofísica de Membranas do Instituto de Ciências Biomédicas da USP pelas sugestões no desenvolvimento do trabalho.

À Nanci e Maria Amélia pelo carinho e revisão do texto.

À minha irmã Aline por seus desenhos.

Ao amigo Adevane pelos conselhos e discussões.

Ao professor Vanderlei Cunha Parro da Escola de Engenharia Mauá por ter me motivado a iniciar o Mestrado.

Aos professores José Jaime da Cruz, Fabrício Leonardi e demais do Laboratório de Automação e Controle da Escola Politécnica da USP.

Aos amigos e colegas de trabalho das empresas Dixtal Biomédica e Mosaico Engenharia.

Aos amigos que colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo do trabalho é apresentar o desenvolvimento, simulação e resultados práticos de um Sistema de controle de temperatura, para Experimentos Biomédicos que utilizam soluções aquecidas com vazão variável. O Sistema utiliza um Trocador de Calor projetado para aquecer uma solução que entra no dispositivo a uma temperatura inferior ou igual à do ambiente e sai com o valor programado. A solução é aquecida a partir da água de um reservatório com temperatura controlada. O Controlador de temperatura é do tipo proporcional-integral-derivativo digital e utiliza um microcontrolador para implementação do algoritmo de controle, da aquisição do sinal dos sensores de temperatura, do comando de atuadores e da interface com o usuário.

ABSTRACT

The objective of the work is to present the development, simulation and practical results of a temperature control System for Biomedical Experiments that utilize heated solutions with variable outflow. The System uses a Heat Exchanger designed to heat the solution that enters into device with a lower or the same temperature as the environment and leaves with the programmed value. The Biomedical solution is heated using the Heat Exchanger and water of the reservoir where the temperature is controlled. The digital proportional-integral-derivative temperature Controller takes use of a microcontroller for implementation of the control algorithm, data acquisition of the temperature sensors, command of actuators and user interface.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS	14
CONVERSÃO DE UNIDADES.....	16
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Descrição do problema	17
1.2 Objetivo.....	18
1.3 Metodologia	18
1.4 Conteúdo e Organização.....	20
2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE	21
2.1 Diagrama do Sistema	21
2.2 Características do Sistema.....	22
3 TANQUE DE AQUECIMENTO	24
3.1 Modelo do Tanque.....	25
3.2 Simulador do Tanque	26
3.3 Construção do Tanque.....	28
3.4 Validação do Modelo do Tanque	29
4 TROCADOR DE CALOR.....	33
4.1 Mecânica do Trocador de Calor	33
4.2 Modelo do Trocador de Calor.....	34
4.3 Simulador do Trocador de Calor.....	40
4.4 Construção do Trocador de Calor	41
4.4.1 Características dos Trocadores de Calor	42

4.4.2	Simulações dos Trocadores de Calor construídos	45
4.5	Validação do Modelo e Resultados Experimentais.....	47
4.5.1	Resultados do Primeiro ensaio	50
4.5.2	Resultados do Segundo Ensaio.....	52
4.5.3	Resultados do Terceiro Ensaio	54
4.5.4	Resultados do Quarto Ensaio.....	56
4.5.5	Resultados do Quinto Ensaio.....	58
4.5.6	Resultados do Sexto Ensaio.....	60
4.5.7	Resultados do Sétimo Ensaio	62
4.5.8	Conclusões Baseadas nos Ensaios	65
5	CONTROLADOR.....	66
5.1	Modelo do Controlador	67
5.2	Simulador do Controlador	71
5.3	Implementação	72
5.3.1	Ferramentas de desenvolvimento	72
5.3.2	Características da implementação	73
5.4	Validação do Controlador	77
6	SISTEMA DE CONTROLE	78
6.1	Atuador	78
6.2	Simulador do Sistema de Controle	80
6.3	Sistema Construído	82
6.4	Controle de Temperatura.....	85
6.5	Validação do Sistema de Controle	87
7	CONCLUSÕES.....	93
A1	COMPONENTES DO SISTEMA	94
A1.1	Bomba de água.....	94
A1.2	Resistência de aquecimento	94
A1.3	Sensor de temperatura do Tanque.....	95
A1.4	Sensor de temperatura do tubo do Trocador de Calor	96
A1.5	Bureta graduada	96
A1.6	Termômetro de mercúrio com bulbo de vidro.....	97
A2	PLACA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE.....	99
A2.1	Esquema Elétrico da Placa	100

A2.2 Montagem da Placa	102
A3 VALIDAÇÃO DO CONTROLADOR PID	103
A3.1 Diagrama de simulação para validação do Controlador.....	105
A3.2 Validação	105
A3.3 Controlador Proporcional (P)	106
A3.4 Controlador Proporcional + Integral (PI)	107
A3.5 Teste do anti Windup	109
A3.6 Controlador Proporcional + Derivativo (PD)	110
A4 CÓDIGO FONTE CONTROLADOR PID	112
A5 PROGRAMAS PARA MATLAB	118
A5.1 Arquivo para Tanque.....	118
A5.2 Arquivo para Trocador de Calor	118
A5.3 Arquivo para Simulador do Controlador PID.....	120
A5.4 Programa para coleta de dados	121
A6 ARTIGO PUBLICADO.....	123
LISTA DE REFERÊNCIAS	124

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Diagrama de blocos do Sistema de controle de temperatura	21
Figura 2 Representação esquemática do Tanque.....	24
Figura 3 Simulador do Tanque de aquecimento	27
Figura 4 Diagrama de blocos do Simulador do Tanque	27
Figura 5 Foto do Tanque de aquecimento	29
Figura 6 Resultado do ensaio do Tanque de aquecimento	31
Figura 7 Gráfico da simulação e resultados do Tanque	32
Figura 8 Desenho mecânico de um Trocador de Calor casco-tubo	34
Figura 9 Desenho esquemático de um Trocador de Calor.....	35
Figura 10 Representação gráfica do MLDT	38
Figura 11 Simulador do Trocador de Calor.....	40
Figura 12 Diagrama de blocos do Simulador do Trocador de Calor.....	41
Figura 13 Foto do Trocador de Calor 1	43
Figura 14 Foto do Trocador de Calor 2	43
Figura 15 Simulação dos Trocadores para $Q_c(t)=2500\text{ml/min}$ e $T_{ec}(t)=37,0^\circ\text{C}$	45
Figura 16 Simulação dos Trocadores de Calor para $T_e(t)=15,0^\circ\text{C}$ e $T_{ec}(t)=37,0^\circ\text{C}$ ..	46
Figura 17 Diagrama de entradas e saídas para validação do Trocador de Calor.....	49
Figura 18 Ensaio com $Q_c(t)=1909\text{ ml/min}$, $L=140\text{mm}$ e $T_{et}(t)=19,0^\circ\text{C}$	51
Figura 19 Simulação do primeiro ensaio para $Q_c(t)=1909\text{ ml/min}$ e $T_{et}(t)=19,0^\circ\text{C}$ ...	52
Figura 20 Ensaio com $Q_c(t)=2720\text{ ml/min}$, $L=140\text{ mm}$ e $T_{et}(t)=19,0^\circ\text{C}$	54
Figura 21 Ensaio com $Q_c(t)=1909\text{ ml/min}$, $L=140\text{mm}$ e $T_{et}(t)=19,0^\circ\text{C}$	56
Figura 22 Ensaio com $Q_c(t)=1569\text{ ml/min}$, $L=140\text{mm}$ e $T_{et}(t)=19,0^\circ\text{C}$	58
Figura 23 Ensaio com $Q_c(t)=2720\text{ ml/min}$, $L=170\text{mm}$ e $T_{et}(t)=17,0^\circ\text{C}$	60
Figura 24 Ensaio com $Q_c(t)=1569\text{ ml/min}$, $L=170\text{mm}$ e $T_{et}(t)=17,0^\circ\text{C}$	62
Figura 25 Trocador 2 com $Q_c(t)=2500\text{ ml/min}$, $L=300\text{mm}$ e $T_{et}(t)= (t)26,0^\circ\text{C}$	64
Figura 26 Simulador do Controlador PID	71
Figura 27 Diagrama da implementação do Controlador PID	74
Figura 28 Fluxo de eventos do algoritmo do Controlador PID	76
Figura 29 Representação do controle do ângulo de disparo do Triac	79
Figura 30 Simulador do Sistema de controle	81
Figura 31 Foto do Sistema de controle	83
Figura 32 Foto detalhada do Sistema de controle.....	84
Figura 33 Resultado do Controlador Proporcional	88
Figura 34 Resultado do Controlador Proporcional + Integral	89
Figura 35 Resultado do Sistema de controle de temperatura	90
Figura 36 Foto da bomba de água	94
Figura 37 Foto da resistência de aquecimento.....	95
Figura 38 Foto do sensor de temperatura	96
Figura 39 Foto da bureta graduada	97
Figura 40 Foto do termômetro.....	97
Figura 41 Esquema elétrico Placa aquisição e controle (CPU e interface)	100
Figura 42 Esquema elétrico Placa aquisição e controle (sensores e atuadores)	101
Figura 43 Foto da Placa de aquisição e controle	102

Figura 44	Diagrama de blocos da implementação do Controlador PID.....	103
Figura 45	Diagrama do Simulador para validação do Controlador PID	105
Figura 46	Resposta do Controlador P à onda quadrada.....	106
Figura 47	Resposta do Controlador P à onda triangular.....	107
Figura 48	Resposta do Controlador PI à onda quadrada	108
Figura 49	Teste anti Windup do Controlador PI	109
Figura 50	Resposta do Controlador PD à onda quadrada.....	110
Figura 51	Resposta do Controlador PD à onda triangular.....	111

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1	Características construtivas dos Trocadores de Calor 42
Tabela 2	Coefficientes globais de troca de calor 44
Tabela 3	Relação dos experimentos para validação do Trocador de Calor..... 49
Tabela 4	Resultados do Segundo Ensaio da Validação do Trocador de Calor..... 53
Tabela 5	Resultados do Terceiro Ensaio da Validação do Trocador de Calor 55
Tabela 6	Resultados do Quarto Ensaio da Validação do Trocador de Calor 57
Tabela 7	Resultados do Quinto Ensaio da Validação do Trocador de Calor 59
Tabela 8	Resultados do Sexto Ensaio da Validação do Trocador de Calor 61
Tabela 9	Resultados do Sétimo Ensaio da Validação do Trocador de Calor 63
Tabela 10	Comparação do Sistema real com as especificações do projeto..... 92
Tabela 11	Resultados da validação do Controlador P à onda quadrada..... 106
Tabela 12	Resultados da validação do Controlador P à onda triangular..... 107
Tabela 13	Resultados da validação do Controlador PI..... 108
Tabela 14	Resultados da validação do anti Windup do Controlador PI..... 109
Tabela 15	Resultados da validação do Controlador PD à onda quadrada..... 110
Tabela 16	Resultados da validação do Controlador PD à onda triangular 111

LISTA DE ABREVIATURAS

FPB	Filtro Passa Baixas
ISA	The Instrumentation, Systems, and Automation Society
MIPS	Milhões de instruções por segundo
MLDT	Média Logarítmica da Diferença de Temperatura
NTC	Coeficiente Negativo de Temperatura (Negative Temperature Coefficient)
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área de troca de calor entre tubo e casco [m^2]
A_i	área interna do tubo [m^2]
A_o	área externa do tubo [m^2]
b	multiplicador do setpoint do termo proporcional
c	multiplicador do setpoint do termo derivativo
c_p	calor específico do fluido no Tanque [cal/kg.°C]
c_{p_c}	calor específico do fluido do casco [cal/kg.°C]
c_{p_t}	calor específico do fluido do tubo [cal/kg.°C]
d_i	diâmetro interno do tubo [m]
d_o	diâmetro externo do tubo [m]
$e(t)$	erro de controle no domínio do tempo
$E(s)$	erro de controle no domínio de Laplace
D	diâmetro interno do casco [m]
h_i	coeficiente de convecção condutiva do tubo [$W/m^2 \cdot K$]
h_o	coeficiente de convecção condutiva do casco [$W/m^2 \cdot K$]
$I(n)$	termo integral no tempo discreto
$I(s)$	termo integral no domínio de Laplace
k	condutividade térmica do material do tubo [$W/m^2 \cdot K$]
K	ganho do controlador
L	comprimento do tubo [m]
n	instante de tempo discreto
$q(t)$	calor transferido do casco para o tubo [cal/s]
$P(t)$	potência da resistência de aquecimento [W]
$Perdas(t)$	perdas de calor para o ambiente [W]
$Q(t)$	vazão no Tanque [ml/min]
$Q_c(t)$	vazão no casco [ml/min]
$Q_t(t)$	vazão no tubo [ml/min]
$r(t)$	referência do Controlador de temperatura [°C] no domínio do tempo
$R(s)$	referência do Controlador de temperatura [°C] no domínio de Laplace
$R(n)$	referência do Controlador de temperatura [°C] no tempo discreto

ρ_o	densidade do fluido no Tanque [kg/m^3]
ρ_{oc}	densidade média do fluido do casco [kg/m^3]
ρ_{ot}	densidade média do fluido do tubo [kg/m^3]
t	instante de tempo contínuo
T_i	tempo integral [s]
T_d	tempo derivada [s]
$T_e(t)$	temperatura de entrada do fluido no Tanque [$^{\circ}\text{C}$] no domínio do tempo
$T_e(s)$	temperatura de entrada do fluido no Tanque [$^{\circ}\text{C}$] no domínio de Laplace
$T_s(t)$	temperatura de saída do fluido do Tanque [$^{\circ}\text{C}$] no domínio do tempo
$T_s(s)$	temperatura de saída do fluido do Tanque [$^{\circ}\text{C}$] no domínio de Laplace
$T_{ec}(t)$	temperatura de entrada do fluido no casco [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{sc}(t)$	temperatura de saída do fluido no casco [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{et}(t)$	temperatura de entrada do fluido no tubo [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{st}(t)$	temperatura de saída do fluido no tubo [$^{\circ}\text{C}$]
U	coeficiente de troca de calor [$\text{cal/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}$]
$u(t)$	saída de controle no domínio do tempo
$U(s)$	saída de controle no domínio de Laplace
$U(n)$	saída de controle no tempo discreto
u_{low}	valor mínimo da saída de controle
u_{high}	valor máximo da saída de controle
V	volume do fluido no Tanque [m^3]
V_c	volume do casco [m^3]
V_t	volume do tubo [m^3]
$V(s)$	saída de controle no domínio de Laplace sem saturação do atuador
$V(n)$	saída de controle no tempo discreto sem saturação do atuador
$y(t)$	saída medida do processo [$^{\circ}\text{C}$] no domínio do tempo
$Y(s)$	saída medida do processo [$^{\circ}\text{C}$] no domínio de Laplace
$Y(n)$	saída medida do processo [$^{\circ}\text{C}$] no tempo discreto

CONVERSÃO DE UNIDADES

1 cal	4,1868 J
1 W	1 J/s
1 ml/min	$6^{-1} \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
1 ml	10^{-6} m^3

1 INTRODUÇÃO

Nos Experimentos Biomédicos realizados com tecidos de animais de sangue quente são utilizadas soluções constituídas basicamente por água. Estas soluções são aquecidas em função do tipo de análise que se deseja realizar e sua vazão pode variar de 0 a 10ml/min (VIEIRA; FILHO, 1999).

Os resultados dos Experimentos Biomédicos são obtidos por meio de medições de sinais elétricos e impedância dos tecidos dos animais de sangue quente. Tais sinais elétricos, por possuírem pequena intensidade, são difíceis de serem medidos. Desta forma, os resultados são suscetíveis à interferência eletromagnética de baixa intensidade e, por este motivo, são realizados no interior de uma caixa metálica denominada Gaiola de Faraday que tem a função de blindagem contra a interferência eletromagnética. No interior da Gaiola, o ambiente está livre da interferência externa. Além disso, no seu interior não existem componentes elétricos evitando a interferência interna.

Trabalhos anteriores (VIEIRA; FILHO, 1999), utilizam uma resistência elétrica como elemento de aquecimento que fornece calor diretamente a uma solução. No entanto, esta prática altera os resultados, pois a resistência elétrica ocasiona interferência eletromagnética.

Para manter a temperatura de ensaio no valor desejado, é necessário o uso de um Sistema de controle projetado para atender aos pré-requisitos dos Experimentos Biomédicos, ou seja, o Controlador e o Sistema não podem interferir nos resultados dos ensaios.

1.1 Descrição do problema

O desafio deste trabalho é desenvolver um Sistema de controle de temperatura capaz de aquecer uma solução utilizada nos Experimentos Biomédicos, sem provocar interferência na realização das mesmas.

A vazão da solução Biomédica varia livremente conforme a necessidade do ensaio durante o período do Experimento. Desta forma, o Sistema de controle deve ser robusto para evitar variações na temperatura da solução quando a vazão da mesma é alterada.

Um Controlador de temperatura deve ser utilizado com a finalidade de manter a temperatura dos Experimentos Biomédicos constante em um valor pré-estabelecido e realizar a compensação das perdas de calor do Sistema para o meio ambiente.

O Sistema deve possuir um Atuador de aquecimento construído de tal forma que forneça calor ao fluido Biomédico que se deseja aquecer, sem que existam componentes elétricos no interior da Gaiola de Faraday, evitando a interferência nos resultados dos Experimentos.

1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um Sistema que controle a temperatura da solução de Experimentos Biomédicos e que não interfira nos resultados dos mesmos. O Sistema deve possuir seleção da temperatura de realização dos Experimentos, sendo possível o seu ajuste entre 35,0°C e 39,0°C, com incerteza de 1,0°C e que permita variação da vazão da solução entre 0,0 ml/min e 10,0 ml/min, sem a necessidade da sua medição.

A temperatura da solução não pode ultrapassar 40°C. Sendo assim, transitórios de controle devem ser limitados de forma que o valor máximo de temperatura não seja ultrapassado.

Deseja-se que o Experimento Biomédico possa ser iniciado em menos de 10 minutos depois que o Sistema seja ligado. Quando o Experimento for iniciado, a solução deve deixar o Sistema com a temperatura programada para o ensaio.

A solução utilizada nos Experimentos Biomédicos possui propriedades físicas que podem ser consideradas iguais às da água. Por este motivo, para simplificar o desenvolvimento do trabalho, o Sistema pode ser analisado e projetado substituindo-se a solução Biomédica por água.

1.3 Metodologia

As tarefas desenvolvidas durante a pesquisa podem ser divididas em três etapas:

- Formulação de uma base teórica;
- Implementação prática baseada na teoria;
- Validação dos resultados por comparação entre os valores esperados teóricos e os experimentais.

A execução do trabalho foi baseada no seguinte roteiro de atividades:

- A partir das características dos Experimentos Biomédicos, foram definidos os requisitos de funcionamento do Sistema de controle de temperatura;
- Definido o Sistema de controle, foi realizada a escolha dos seus componentes;
- Escolhidos os componentes e definido o Sistema, quatro componentes principais passaram a ser objeto de estudo: Tanque de aquecimento, Trocador de Calor, Controlador e Placa de aquisição e controle;
- Para construir o Tanque de aquecimento, desenvolveu-se um Simulador no programa Matlab. O Simulador foi utilizado na realização de algumas simulações para definição das características construtivas empregadas na montagem do Tanque. A validação do modelo foi realizada através da comparação dos dados coletados a partir do Tanque construído e valores teóricos obtidos com o Simulador;
- A construção do Trocador de Calor seguiu um procedimento semelhante ao adotado para a construção do Tanque de aquecimento. Para desenvolver o Trocador de Calor, foi utilizado um modelo analítico que originou um Simulador no programa Matlab. As características construtivas utilizadas na montagem do Trocador de Calor foram definidas a partir de simulações. A validação do modelo foi realizada através da comparação de dados coletados a partir do Trocador de Calor construído e valores teóricos obtidos com o Simulador;
- O desenvolvimento do Controlador foi dividido em quatro etapas realizadas na seguinte ordem: escolha do tipo de Controlador, desenvolvimento de um Simulador no programa Matlab a partir do modelo teórico escolhido, implementação e sintonia dos parâmetros do Controlador. Na implementação do Controlador, foi utilizado um microcontrolador e Linguagem C para a sua programação. A validação do Controlador foi realizada através de ensaios com um gerador de sinais;
- A validação do Sistema de controle foi estabelecida pela coleta dos dados do Sistema em malha fechada com o Controlador sintonizado. Os dados coletados foram comparados com os valores teóricos obtidos por meio dos Simuladores;

- Desenvolvimento de uma Placa de aquisição e controle utilizada em todas as validações do trabalho.

1.4 Conteúdo e Organização

Para uma melhor compreensão do trabalho, a dissertação foi dividida em capítulos de acordo com a relação a seguir:

- Capítulo 1 – Introdução, motivação para desenvolvimento do trabalho, descrição do problema e apresentação dos objetivos;
- Capítulo 2 – Descrição do Sistema de controle onde se encontra a apresentação da solução proposta para desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 3 – Este capítulo contém o modelo matemático, simulações, desenvolvimento do Tanque de Aquecimento construído e a validação do modelo, a partir de resultados experimentais;
- Capítulo 4 – O capítulo aborda o desenvolvimento do Trocador de Calor incluindo o seu modelo matemático, simulações, construção e validação do modelo, a partir de resultados experimentais;
- Capítulo 5 – Este capítulo versa sobre o Controlador PID desenvolvido incluindo as equações e considerações relativas à sua implementação;
- Capítulo 6 – Sistema de Controle de Temperatura: apresentação do Sistema de controle construído e apresentação dos resultados experimentais obtidos;
- Capítulo 7 – Conclusão do trabalho;
- Anexo 1 – Componentes do Sistema: contém as principais características dos componentes utilizados na construção do Sistema de controle;
- Anexo 2 – Esquema elétrico e funcionalidade da Placa de aquisição e controle;
- Anexo 3 – Resultados experimentais da validação do Controlador PID;
- Anexo 4 – Programa em Linguagem C desenvolvido para a implementação do Controlador PID;
- Anexo 5 – Programas desenvolvidos no programa Matlab para simulação dos componentes do Sistema e aquisição de dados;
- Anexo 6 – Informações referentes ao Artigo publicado.

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Para que uma solução Biomédica seja aquecida, foi desenvolvido um Sistema de controle composto por um Trocador de Calor de pequenas dimensões, montado dentro de uma Gaiola de Faraday, um Tanque de aquecimento e elementos elétricos de atuação e controle.

2.1 Diagrama do Sistema

A seguir, na Figura 1, encontra-se a representação do Sistema de controle de temperatura proposto.

Figura 1 Diagrama de blocos do Sistema de controle de temperatura

O objetivo deste diagrama é permitir a compreensão do funcionamento do Sistema e a interação dos seus componentes

Descrição dos elementos do Sistema de controle:

- Gaiola de Faraday: caixa metálica que atenua a influência da radiação eletromagnética externa. No interior da Gaiola, encontra-se a solução que deve ser aquecida;
- Bureta graduada: armazena a solução fria que deve ser aquecida e permite ajustar a sua vazão;
- Trocador de Calor: elemento mecânico que permite aquecer uma solução fria a partir de um fluido aquecido no Tanque, quando os fluidos escoam pelo Trocador de Calor;
- Tanque: armazena a água aquecida que circula pelo Trocador de Calor;
- Bomba de água: impulsiona a água do Tanque ao casco do Trocador de Calor;
- Atuador: fornece energia para a resistência elétrica que aquece a água do Tanque. A potência fornecida é proporcional ao sinal $u(t)$ do Controlador;
- Resistência de aquecimento: aquece a água do Tanque;
- Sensores de Temperatura: medem a temperatura do fluido no interior Tanque e da solução aquecida quando esta sai do Trocador de Calor;
- Controlador PID digital: controla a temperatura do fluido no interior do Tanque. O Controlador utiliza os valores de referência $r(t)$ e sinal de temperatura $y(t)$ para realimentar o Sistema;
- Coletor de dados: dispositivo eletrônico que coleta os sinais dos sensores de temperatura $y(t)$ e $T_{st}(t)$.

2.2 Características do Sistema

O Trocador de Calor é o elemento principal do Sistema. Foi desenvolvido de forma que a solução dos ensaios Biomédicos possa entrar no Trocador com temperatura menor que a temperatura que se deseja atingir e possa sair com a mesma temperatura do segundo fluido que circula aquecido pelo Trocador de Calor. Desta forma, para vazões compreendidas dentro da faixa de trabalho, a solução Biomédica atinge o equilíbrio térmico com o fluido que lhe fornece calor.

Assim, pode-se controlar a temperatura do fluido no Tanque de aquecimento e, indiretamente, controlar a temperatura da solução Biomédica.

Uma vantagem deste Sistema é a ausência de transitórios na temperatura controlada quando se varia a vazão da solução Biomédica. Em outros Sistemas, variando-se a vazão altera-se a temperatura da solução que é corrigida pelo Controlador, acarretando oscilações na temperatura controlada. O Sistema proposto não apresenta esta característica, minimizando os transitórios de controle. Esta é, na verdade, a grande virtude do Sistema proposto.

O funcionamento do Sistema pode ser descrito da seguinte maneira:

- Antes de iniciar os ensaios Biomédicos, deve-se ligar a bomba de água e o Controlador;
- A temperatura da água no interior do Tanque é controlada em um valor pré-determinado;
- Quando o transitório inicial termina, ou seja, a temperatura no Tanque atinge o valor de regime com erro estacionário nulo, o Sistema se encontra em condições de uso. Neste momento, o usuário pode iniciar a realização dos Experimentos Biomédicos;
- Com o Sistema pronto para ser utilizado, a primeira gota da solução Biomédica que passar pelo Trocador de Calor, dentro da faixa de vazão projetada, sairá do Trocador com a temperatura igual à do fluido do Tanque, ou seja, a temperatura programada para realização do ensaio;
- O Controlador de temperatura fica ligado durante o experimento para compensar as perdas de calor para o meio ambiente que reduzem a temperatura do fluido no Tanque.

3 TANQUE DE AQUECIMENTO

O Tanque de aquecimento é o elemento do Sistema de controle que armazena o fluido que fornece calor para a solução dos Experimentos Biomédicos.

No interior do Tanque, há um sensor para medição e controle da temperatura da água, uma resistência de aquecimento para elevar a temperatura do fluido e uma bomba de água que transporta o fluido para fora do Tanque, conforme Figura 2. O Tanque possui duas conexões, sendo uma para saída e outra para entrada da água.

Figura 2 Representação esquemática do Tanque

Onde:

$P(t)$: potência fornecida pela resistência elétrica [W];

$Q(t)$: vazão da bomba de água [ml/min];

$Perdas(t)$: calor perdido para o ambiente [W];

$T_e(t)$: temperatura de entrada do fluido no Tanque [°C];

$T_s(t)$: temperatura de saída do fluido do Tanque [°C].

A bomba está localizada no fundo do Tanque. Desta forma, a água do fundo é transportada para fora e o seu retorno ocorre no topo do Tanque. Esta construção tem por objetivo funcionar como um agitador, tornando a temperatura da água homogênea no interior do Tanque.

3.1 Modelo do Tanque

O modelo do Tanque foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a dinâmica da temperatura da água no seu interior, em função dos seguintes parâmetros: potência da resistência elétrica, perdas para o ambiente, temperatura de entrada do fluido no Tanque e vazão da bomba.

A equação fundamental utilizada para descrever a dinâmica de funcionamento do Tanque é apresentada por OGATA (1997), em uma análise de balanço de energia. O modelo considera as perdas para o ambiente, conforme a equação diferencial a seguir:

$$\frac{P(t) - Perdas(t)}{4,1868} + ro \cdot cp \cdot \frac{Q(t)}{6 \cdot 10^7} \cdot [T_e(t) - T_s(t)] = ro \cdot cp \cdot V \cdot \frac{dT_s(t)}{dt} \quad (3-1)$$

Onde:

cp : calor específico do fluido [cal/kg.°C];

ro : densidade do fluido [kg/m³];

V : volume do fluido no interior do Tanque [m³].

Os termos $P(t)$ e $Perdas(t)$ foram divididos por 4,1868 para converter a unidade de potência para cal/s. O termo $Q(t)$ foi dividido por $6 \cdot 10^7$ para converter a vazão para m³/s.

É possível avaliar o funcionamento do Tanque como um reservatório de água com uma resistência de aquecimento no seu interior, ou seja, sem a saída e a entrada de água. O mesmo ocorre se a temperatura de entrada (T_e) for igual à temperatura de saída (T_s). Nesta situação, o funcionamento do Tanque pode ser avaliado com a utilização da seguinte equação:

$$\frac{P(t) - Perdas(t)}{4,1868} = ro \cdot cp \cdot V \cdot \frac{dT_s(t)}{dt} \quad (3-2)$$

A equação (3-2) caracteriza um processo do tipo 1, ou seja, o Tanque tem o comportamento de um integrador puro. Isto implica em que a resposta do Tanque a um

degrau de potência na resistência de aquecimento apresenta variação do tipo rampa na temperatura do fluido no interior do Tanque.

Considerando as perdas da equação 3-2 iguais a zero e reescrevendo-a no domínio de Laplace, a relação entre a temperatura no Tanque e a potência da resistência de aquecimento é:

$$\frac{T_s(s)}{P(s)} = \frac{1}{4,1868 \cdot r_o \cdot c_p \cdot V} \cdot \frac{1}{S} \quad (3-3)$$

Outra verificação é o caso onde a resistência de aquecimento fica desligada e não há perdas para o ambiente. Neste caso, para uma vazão constante (Q) na bomba de água, pode-se avaliar o efeito da temperatura de entrada do fluido no Tanque. A equação, a seguir, descreve o funcionamento do Tanque no domínio de Laplace:

$$\frac{T_s(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{1 + S \cdot V/Q} \quad (3-4)$$

O Tanque funciona como um Sistema de primeira ordem com constante de tempo V/Q . As variáveis $T_e(s)$ e $T_s(s)$ no domínio de Laplace possuem as mesmas unidades das respectivas variáveis no domínio do tempo.

3.2 Simulador do Tanque

O Simulador do Tanque foi desenvolvido para avaliar o funcionamento do dispositivo e validar o modelo apresentado. A implementação do Simulador utiliza o programa Simulink.

Ao utilizar a equação do modelo dinâmico do Tanque, chega-se ao Simulador com 4 entradas e 1 saída, conforme Figura 3.

Figura 3 Simulador do Tanque de aquecimento

O Simulador do Tanque da Figura 3 pode ser representado de forma simplificada em um diagrama de blocos com entradas e saídas. Este diagrama está representado na Figura 4.

Figura 4 Diagrama de blocos do Simulador do Tanque

No diagrama da Figura 4, geradores de sinais foram ligados às entradas do modelo para simular o funcionamento do Tanque. Neste diagrama, a entrada de temperatura (T_e) foi conectada à saída do Simulador e não a um gerador de sinais. Isto foi feito para avaliar o funcionamento do Tanque quando a saída da bomba está conectada à entrada do Tanque.

Além do diagrama desenvolvido no programa Simulink, foi criado um arquivo no programa Matlab no qual foram definidas as características construtivas do Tanque utilizadas nas simulações. O arquivo se encontra no Anexo 5, designado Arquivo para Tanque.

3.3 Construção do Tanque

As dimensões e características construtivas do Tanque foram determinadas por meio de simulações, ou seja, o modelo foi utilizado para dimensionar o Tanque.

O dimensionamento foi realizado com o objetivo de armazenar, no mínimo, 650ml de água. A potência da resistência de aquecimento foi dimensionada para que a água sofresse uma variação de 20°C em menos de 120s. Determinadas estas características, o Tanque foi montado com componentes disponíveis no mercado (Anexo 1 - Componentes do Sistema).

O Tanque foi construído com um recipiente de vidro e tampa plástica com passagem para mangueiras de entrada e saída de água. O recipiente de vidro possui capacidade para armazenar 1000ml de água.

Para aquecer a água do Tanque, foi empregada uma resistência elétrica comercial com potência de 425W e alimentação 110V corrente alternada (Anexo 1.2).

A bomba de água possui capacidade máxima de vazão de 3000 ml/min e alimentação de 12V corrente contínua. Este modelo de bomba é utilizado na indústria automotiva (Anexo 1.1).

O sensor de temperatura que foi posicionado no interior do Tanque, entre a bomba de água e a resistência de aquecimento, possui incerteza de $0,2^{\circ}\text{C}$ e constante de tempo de 200ms (Anexo 1.3).

Na Figura 5, encontra-se a foto do Tanque de aquecimento construído.

Figura 5 Foto do Tanque de aquecimento

A água localizada no fundo do Tanque é bombeada e, depois de circular pelo Trocador de Calor, é despejada novamente no Tanque em sua parte superior, funcionando como um agitador.

As perdas para o ambiente serão calculadas através de resultados obtidos a partir de ensaios com o Tanque, no item Validação do Modelo do Tanque.

3.4 Validação do Modelo do Tanque

O objetivo da validação é verificar se o modelo apresentado permite determinar o funcionamento do Tanque construído. A validação foi realizada através da comparação entre os valores teóricos calculados com o Simulador e os resultados experimentais.

Para a obtenção dos resultados experimentais, foi realizado um ensaio com o Tanque construído. A realização do ensaio foi dividida em etapas:

- Foram colocados 650ml de água no Tanque;
- A saída da bomba foi conectada à entrada de água do Tanque, utilizando-se uma mangueira;

- A resistência de aquecimento e a bomba de água foram ligadas na potência máxima;
- Utilizando-se o sensor de temperatura do Tanque (Anexo 1.3), mediu-se a temperatura da água no interior do Tanque;
- A resistência de aquecimento foi desligada quando a temperatura no Tanque atingiu aproximadamente 38,0°C;
- Com a bomba de água ainda ligada, mediu-se a temperatura da água no interior do Tanque para verificar o comportamento do resfriamento e determinar a quantidade de calor perdida para o ambiente;
- Foi utilizada a frequência de 4Hz na amostragem do sensor de temperatura do Tanque.

O sinal do sensor de temperatura foi medido utilizando-se a placa de Aquisição e Controle. Com a placa conectada a um computador, foram coletados os dados experimentais.

O programa desenvolvido para a coleta de dados, utilizando o computador, encontra-se no Anexo 5.4, designado Programa para Coleta de Dados.

Na Figura 6, encontram-se os resultados deste ensaio onde é possível observar que a resistência foi ligada no instante 20,5s e desligada no instante 95s.

A variação de temperatura durante o intervalo de tempo em que a resistência ficou ligada é:

$$\frac{\Delta T_s(t)}{\Delta t} = \frac{38,0 - 26,6}{95,0 - 20,5} = 0,153^\circ\text{C/s}$$

Durante o intervalo de tempo compreendido entre 105s e 400s, a resistência ficou desligada. A diminuição da temperatura durante este intervalo de tempo se deve somente às perdas para o ambiente.

A variação de temperatura após desligar a resistência é:

$$\frac{\Delta T_s(t)}{\Delta t} = \frac{38,3 - 38,6}{400,0 - 105,0} = -0,00101^\circ\text{C/s}$$

Figura 6 Resultado do ensaio do Tanque de aquecimento

A potência perdida para o ambiente foi calculada a partir da equação (3-2) e vale 2,74W. O valor da perda para o ambiente varia em função da temperatura ambiente, no entanto, o Tanque será utilizado em ambientes com temperatura controlada próximas a 25°C e o valor calculado pode ser utilizado sem prejuízos para o resultado final.

A partir do valor da potência perdida para o ambiente, calculada anteriormente, foi realizada uma simulação para obtenção dos valores teóricos do ensaio. A simulação foi realizada com as mesmas condições do ensaio experimental, ou seja, foram mantidos: o volume de água no Tanque, a potência na resistência, a temperatura inicial da água no Tanque e a vazão na bomba. Para realizar esta simulação, foi utilizado o diagrama da Figura 4.

Na Figura 7, encontram-se os resultados da simulação na cor vermelha e os resultados experimentais na cor azul. Os resultados experimentais são iguais aos apresentados anteriormente na Figura 6.

Figura 7 Gráfico da simulação e resultados do Tanque

Avaliando os dados do gráfico da Figura 7, verifica-se que a curva dos valores teóricos acompanha a curva dos valores experimentais, tanto no aquecimento quanto no resfriamento. Desta forma, conclui-se que o modelo do Tanque é apropriado para que se avalie o funcionamento do Tanque.

O resfriamento do Tanque, taxa de $0,001^{\circ}\text{C/s}$, é mais lento que o seu aquecimento, taxa de $0,153^{\circ}\text{C/s}$. A relação entre aquecimento e resfriamento é de aproximadamente 150. Caso seja necessário, pode-se, em trabalhos futuros, criar um modelo para estimar a variação da perda de calor para o ambiente, em função da temperatura ambiente.

4 TROCADOR DE CALOR

O Trocador de Calor é o elemento do Sistema de controle responsável por aquecer uma solução Biomédica.

Ele foi desenvolvido para que uma solução possa escoar pelo mesmo, com vazão dentro da faixa de interesse, e atinja o equilíbrio térmico com o segundo fluido que escoa pelo casco do Trocador de Calor.

Mesmo trabalhando em conjunto com o Tanque e o Controlador, conforme apresentado no Capítulo 2, é possível estudar o Trocador de Calor de forma independente.

O primeiro passo no desenvolvimento do Trocador de Calor foi obter um modelo analítico que permitisse avaliar o seu funcionamento. Após a definição do modelo, foi desenvolvido um Simulador no programa Simulink.

A partir do Simulador, foi realizada uma análise das características mecânicas para que fosse possível construir um Trocador de Calor que atendesse às necessidades do projeto. Após a sua montagem, foi feita a validação do modelo por meio da comparação de dados coletados a partir do Trocador de Calor construído e dos valores teóricos obtidos com o Simulador.

Há várias formas de se construir um Trocador de Calor, ou seja, diferentes formatos geométricos poderiam ser utilizados para promover a troca de calor entre os dois fluidos (BOHN; KREITH, 1997). O formato geométrico escolhido, pela sua simplicidade, foi o Trocador de Calor do tipo casco-tubo.

4.1 Mecânica do Trocador de Calor

A denominação casco-tubo se refere ao formato de um tubo cilíndrico na parte externa, designado casco, dentro do qual há um segundo tubo com diâmetro menor, designado tubo.

O desenho mecânico simplificado de um Trocador de Calor do tipo casco-tubo se encontra na Figura 8.

Figura 8 Desenho mecânico de um Trocador de Calor casco-tubo

Descrição da simbologia:

- D : diâmetro interno do casco [m];
- d_i : diâmetro interno do tubo [m];
- d_o : diâmetro externo do tubo [m];
- L : comprimento do tubo [m].

4.2 Modelo do Trocador de Calor

O modelo fenomenológico do Trocador de Calor a parâmetros concentrados foi desenvolvido a partir das equações fundamentais de um Trocador de Calor do tipo casco-tubo, obtidas a partir da análise de balanço de energia do Trocador de Calor (GARCIA, 1997).

Parâmetros concentrados foram utilizados porque não se considera a variação da temperatura dos fluidos ao longo do Trocador de Calor, ou seja, consideram-se apenas as temperaturas nas entradas e saídas (AGUIRRE, 2000).

A seguir, encontram-se as características funcionais do Trocador de Calor adotadas durante o projeto e que influenciaram no desenvolvimento do modelo:

- Dois fluidos escoam pelo Trocador de Calor. O primeiro deles passa dentro do tubo e o segundo pela região compreendida entre o tubo e o casco. Os dois fluidos não entram em contato e não se misturam, pois estão isolados pela parede do tubo central. O calor é transferido de um fluido para o outro por

condução térmica através do tubo que os separa. BOHN; KREITH (1997) classificam este tipo de Trocador como Recuperador;

- Pelo casco do Trocador de Calor escoa o fluido quente e pelo tubo escoa o fluido que se deseja aquecer, designado fluido frio;
- Os dois fluidos escoam no mesmo sentido no interior do Trocador de Calor. Esta escolha obriga o fluido do tubo a sair do Trocador de Calor com temperatura igual ou menor que a temperatura do fluido do casco. O escoamento em sentidos opostos foi descartado, pois permitiria que a temperatura do fluido na saída do tubo atingisse valores superiores à temperatura na saída do casco (BOHN; KREITH, 1997). O escoamento dos fluidos no mesmo sentido é classificado como Correntes-Paralelas.

Na Figura 9, encontra-se o diagrama esquemático do fluxo dos fluidos pelo Trocador de Calor e a simbologia das grandezas físicas de interesse: vazão dos fluidos, temperatura, densidade e calor específico.

Figura 9 Desenho esquemático de um Trocador de Calor

Descrição da simbologia utilizada na Figura 9:

- $Q_c(t)$: vazão no casco [ml/min];
- $Q_t(t)$: vazão no tubo [ml/min];
- $\rho_{c:}$: densidade média do fluido no casco [kg/m^3];
- $\rho_{t:}$: densidade média do fluido no tubo [kg/m^3];
- cp_c : calor específico do fluido no casco [$\text{cal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$];
- cp_t : calor específico do fluido no tubo [$\text{cal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$];
- $T_{ec}(t)$: temperatura de entrada do fluido no casco [$^\circ\text{C}$];
- $T_{sc}(t)$: temperatura de saída do fluido do casco [$^\circ\text{C}$];
- $T_{et}(t)$: temperatura de entrada do fluido no tubo [$^\circ\text{C}$];
- $T_{st}(t)$: temperatura de saída do fluido do tubo [$^\circ\text{C}$].

A seguir, encontra-se a relação com as principais características do modelo:

- Descreve o comportamento de um Sistema Invariante no tempo;
- Desenvolvido para um Trocador de Correntes-Paralelas;
- Considera a ausência de mudança de fase dos fluidos;
- É um modelo a parâmetros concentrados;
- Utiliza a Média Logarítmica da Diferença de Temperaturas (MLTD), para estimar o calor trocado entre os fluidos do tubo e do casco. A Média Logarítmica foi utilizada pois a interface de troca de calor entre os fluidos possui formato geométrico cilíndrico (BOHN; KREITH, 1997);
- Considera o valor médio da densidade dos fluidos;
- As perdas de calor do casco para o ambiente são desprezadas.

A seguir, encontram-se as equações (GARCIA, 1997) do Modelo Fenomenológico do Trocador de Calor:

Área de troca de Calor:

$$A = \pi \cdot d_i \cdot L \quad (4-1)$$

Volume do tubo:

$$V_t = \frac{\pi \cdot d_i^2 \cdot L}{4} \quad (4-2)$$

Volume do casco:

$$V_c = \frac{\pi \cdot (D^2 - d_o^2) \cdot L}{4} \quad (4-3)$$

Dinâmica do casco. A unidade da vazão é ml/min:

$$\frac{Q_c(t)}{6 \cdot 10^7} \cdot [T_{ec}(t) - T_{sc}(t)] - \frac{q(t)}{ro_c \cdot cp_c} = V_c \cdot \frac{dT_{sc}(t)}{dt} \quad (4-4)$$

Dinâmica do tubo. A unidade da vazão é ml/min:

$$\frac{Q_t(t)}{6 \cdot 10^7} \cdot [T_{et}(t) - T_{st}(t)] + \frac{q(t)}{ro_t \cdot cp_t} = V_t \cdot \frac{dT_{st}(t)}{dt} \quad (4-5)$$

Calor transferido do casco para o tubo:

$$q(t) = U \cdot A \cdot MLTD \quad (4-6)$$

Onde U é o coeficiente global de troca de calor do Trocador de Calor.

Equação da MLTD:

$$MLTD = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{Ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)} \quad (4-7)$$

Diferença das temperaturas de entrada:

$$\Delta T_{\max} = T_{ec}(t) - T_{et}(t) \quad (4-8)$$

Diferença das temperaturas de saída:

$$\Delta T_{\min} = T_{sc}(t) - T_{st}(t) \quad (4-9)$$

A temperatura dos fluidos do casco e do tubo variam ao longo do Trocador de Calor como pode ser verificado no gráfico teórico da Figura 10 (BOHN; KREITH, 1997). O modelo utiliza as temperaturas de entrada e saída dos fluidos no Trocador para calcular a MLDT e estimar o calor trocado entre eles.

Figura 10 Representação gráfica do MLDT

GARCIA (1997) sugere que para melhorar os resultados obtidos com o modelo divida-se o Trocador de Calor em Trocadores de menor comprimento e realizem-se simulações como se os Trocadores estivessem interligados em série. Como o objetivo deste trabalho é desenvolver um Trocador de Calor de pequenas dimensões, esta proposta de divisão em Trocadores de menor comprimento não foi utilizada.

O coeficiente global de troca de calor U pode ser calculado pela equação (4-10) (BOHN; KREITH, 1997) em relação à área interna do tubo do Trocador. Este

coeficiente é calculado tendo por base a área interna do tubo, pois o fluido do tubo troca calor por meio desta superfície.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left[\frac{A_i \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \right] + \left(\frac{A_i}{A_o} \cdot \frac{1}{h_o}\right)} \quad (4-10)$$

Termos da equação:

- h_i : coeficiente de convecção condutiva do tubo [$\text{W/m}^2\text{K}$];
- h_o : coeficiente de convecção condutiva do casco [$\text{W/m}^2\text{K}$];
- A_i : área interna do tubo [m^2];
- A_o : área externa do tubo [m^2];
- k : condutividade térmica do material do tubo [$\text{W/m}^2\text{K}$].

Os coeficientes de transferência de calor por convecção condutiva definem a transferência de calor dos fluidos, do casco e do tubo, para o metal que constitui o tubo do Trocador de Calor. O coeficiente h_i define a transferência de calor do fluido que escoar pelo tubo para o metal e h_o a transferência do fluido que escoar pelo casco para o metal. Assim, pode-se avaliar como os dois fluidos trocam calor através da interface que é o tubo do Trocador de Calor.

BOHN; KREITH (1997), apresentam uma tabela na qual são atribuídos valores teóricos para o coeficiente global de troca de calor, em função dos fluidos que escoam pelo Trocador de Calor e respectivos coeficientes de transferência de calor por convecção condutiva. Segundo esta referência bibliográfica, para a água que escoar pelo casco, o coeficiente de convecção condutiva (h_o) deve estar entre 3.000 e 10.000 $\text{W/m}^2\text{K}$. No caso da água que escoar pelo tubo, o coeficiente de convecção condutiva (h_i) deve estar entre 1.000 e 3.000 $\text{W/m}^2\text{K}$. Para estes valores, o coeficiente global de troca de calor U varia entre 900 e 2.500 $\text{W/m}^2\text{K}$. Realizando uma conversão de unidades, o valor de U varia entre 214,96 e 597,11 $\text{cal/s}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

A condutividade térmica do cobre é 399,0 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ (BOHN; KREITH, 1997) e da água é 0,6 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ para a temperatura de 27 $^\circ\text{C}$.

4.3 Simulador do Trocador de Calor

Utilizando as equações do modelo fenomenológico, foi desenvolvido o Simulador computacional do Trocador de Calor no programa Simulink.

O diagrama de simulação, Figura 11, caracteriza um Sistema dinâmico com 4 entradas e 2 saídas.

Figura 11 Simulador do Trocador de Calor

As entradas do modelo são: $T_{et}(t)$, $T_{ec}(t)$, $Q_t(t)$ e $Q_c(t)$. As saídas são: $T_{st}(t)$ e $T_{sc}(t)$.

O Simulador do Trocador de Calor da Figura 11 pode ser representado de forma simplificada em um diagrama de blocos com entradas e saídas. Este diagrama está representado na Figura 12.

Figura 12 Diagrama de blocos do Simulador do Trocador de Calor

No diagrama da Figura 12, geradores de sinais foram ligados às entradas do modelo para simular o funcionamento do Trocador de Calor.

Além do diagrama desenvolvido no programa Simulink, foi criado um arquivo no programa Matlab, no qual foram definidas as características construtivas do Trocador de Calor utilizadas nas simulações. O arquivo se encontra no Anexo 5, designado Arquivo para Trocador de Calor.

4.4 Construção do Trocador de Calor

Utilizando o Simulador do Trocador de Calor, foram realizadas simulações variando-se as dimensões mecânicas e materiais do Trocador de Calor, para a definição das características construtivas utilizadas na montagem.

Foram construídos dois Trocadores de Calor:

- O primeiro para a vazão de 0,0 a 4,0 ml/min. Este Trocador de Calor foi construído com o objetivo de facilitar a validação do modelo por possuir dimensões menores;
- O segundo para a vazão de 0,0 a 10,0 ml/min. Este Trocador de Calor foi construído com o objetivo de permitir maior de vazão de escoamento do fluido pelo tubo.

No momento da construção do primeiro Trocador de Calor, não havia resultados práticos relacionados ao desenvolvimento deste componente e existiam algumas dúvidas sobre a melhor forma geométrica para construí-lo. Então, optou-se pela montagem de um Trocador de Calor de menor vazão porque era mais fácil de ser construído.

4.4.1 Características dos Trocadores de Calor

Na Tabela 1, encontram-se as dimensões mecânicas e características construtivas utilizadas na montagem dos Trocadores de Calor:

Tabela 1 Características construtivas dos Trocadores de Calor

Parâmetro	Trocador 1	Trocador 2
Diâmetro interno do casco (D)	13,0 mm	13,0 mm
Diâmetro interno do tubo (di)	1,0 mm	1,9 mm
Diâmetro externo do tubo (do)	2,0 mm	3,18 mm
Comprimento do tubo (L)	170,0 mm	300,0 mm
Material do casco	Plástico	Plástico
Material do tubo	Cobre	Cobre

Para a construção do casco dos Trocadores de Calor foram utilizados tubos e conexões de plástico. A opção pelo material plástico se deu por apresentar baixa condutividade térmica, reduzindo as perdas de calor para o ambiente.

Na Figura 13, encontra-se a foto do Trocador de Calor 1.

Figura 13 Foto do Trocador de Calor 1

O material de cor branca é casco do Trocador do Calor. No seu interior, há um tubo de Cobre. No casco, existem duas conexões para engate rápido de mangueiras com diâmetro interno de 5mm. Estas conexões são utilizadas para entrada e saída do fluido que escoar pelo casco do Trocador de Calor. O tubo de cobre permite conexão com mangueira por onde pode escoar uma solução Biomédica.

Na Figura 14, encontra-se a foto do Trocador de Calor 2.

Figura 14 Foto do Trocador de Calor 2

O Trocador de Calor 2 foi construído com os mesmos materiais do Trocador 1. No entanto, foram alteradas as dimensões do tubo de cobre que possui diâmetros interno e externo diferentes (Tabela 1). As conexões e mangueiras utilizadas também são iguais. Os tubos dos Trocadores de Calor foram construídos com tubos de cobre, pois este metal apresenta boa condutividade térmica e promove um coeficiente global de troca de calor (U) elevado, próximo ao valor máximo teórico apresentado por BOHN; KREITH (1997). A partir das dimensões construtivas dos Trocadores de Calor, foram calculados os coeficientes globais de troca de calor utilizando a equação (4-10). Os valores calculados se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 Coeficientes globais de troca de calor

Trocador	h_i ($W/m^2 \cdot K$)	h_o ($W/m^2 \cdot K$)	U ($W/m^2 \cdot K$)	U ($cal/m^2 \cdot ^\circ C \cdot s$)
1	2880	9.600	2.499	597
2	2880	9.600	2.435	582

Devido ao uso do cobre, foi adotado o valor máximo de $597 \text{ cal/m}^2 \cdot ^\circ C \cdot s$ para U , conforme apresentado por BOHN; KREITH (1997) e, em seguida, calculados os valores de h_i e h_o utilizando as dimensões construtivas do Trocador de Calor 1. Realizando os cálculos, chegou-se aos valores apresentados na Tabela 2 que representam 96% dos valores máximos de h_i e h_o apresentados por BOHN; KREITH (1997).

Com os valores obtidos de h_i e h_o para o Trocador de Calor 1, foi calculado o valor de U para o Trocador de Calor 2, cujo resultado se encontra na mesma tabela.

Analisando a Tabela 2, pode-se observar que o coeficiente global de troca de calor do Trocador de Calor 2 é um pouco menor devido às diferenças nas dimensões construtivas, no entanto, o calor trocado será maior porque a área (A) do segundo Trocador de Calor é maior que a do primeiro.

Todas as simulações realizadas neste trabalho utilizam os valores dos coeficientes globais de troca de calor da Tabela 2.

4.4.2 Simulações dos Trocadores de Calor construídos

As simulações foram realizadas a partir das características construtivas dos Trocadores de Calor montados.

Utilizando o Simulador da Figura 12, foram realizadas simulações do funcionamento dos Trocadores de Calor em regime estacionário, para verificar a influência das entradas do modelo na temperatura do fluido na saída do tubo.

A simulação foi realizada com os seguintes valores constantes: temperatura do fluido na entrada do casco fixa em 37°C e a vazão do fluido no casco fixa em 2500ml/min . Foram alteradas a vazão do fluido do tubo de $1,0\text{ ml/min}$ a $30,0\text{ ml/min}$ e a temperatura do fluido na entrada dos tubos dos Trocadores de Calor para os valores 15°C , 25°C e 35°C . A partir da simulação, foi calculada a diferença entre a temperatura do fluido na entrada do casco e a temperatura do fluido na saída do tubo de cada um dos Trocadores de Calor. O resultado desta simulação se encontra na Figura 15.

Figura 15 Simulação dos Trocadores para $Q_c(t)=2500\text{ml/min}$ e $T_{cc}(t)=37,0^{\circ}\text{C}$

É possível observar que o fluido do tubo pode escoar pelo Trocador de Calor 1 com vazão menor que 4,0 ml/min e temperatura na entrada do tubo entre 15,0°C e 35,0°C sendo que a temperatura na saída do tubo fica 0,2°C abaixo da temperatura do fluido na entrada do casco. No Trocador de Calor 2, a vazão do fluido no tubo atinge 10,0 ml/min e a diferença entre as temperaturas do fluido na entrada do casco e na saída do tubo é menor que 0,2°C.

Utilizando novamente o Simulador da Figura 12, foram realizadas simulações do funcionamento dos Trocadores de Calor, em regime estacionário, para verificar a influência das entradas do modelo na temperatura na saída do casco dos Trocadores de Calor. A simulação foi realizada com os seguintes valores constantes: temperatura do fluido na entrada do casco do Trocador de Calor fixa em 37°C e temperatura do fluido na entrada do tubo fixa em 15,0°C. Variou-se a vazão do fluido do tubo de 1,0 ml/min a 30,0 ml/min e a vazão do fluido do casco para os valores de 1500 ml/min e 2500 ml/min. A partir da simulação, foi calculada a diferença entre a temperatura do fluido na saída e na entrada do casco de cada um dos Trocadores de Calor. O resultado desta simulação se encontra na Figura 16.

Figura 16 Simulação dos Trocadores de Calor para $T_e(t)=15,0^{\circ}\text{C}$ e $T_{ec}(t)=37,0^{\circ}\text{C}$

A partir da Figura 16, é possível observar que o Trocador de Calor 2 sempre apresenta uma diferença menor entre a temperatura na saída e na entrada do casco que o Trocador de Calor 1. Aumentando a vazão no casco, a diferença entre a temperatura na saída e na entrada do casco fica menor. A diferença aumenta quando a vazão no tubo do Trocador de Calor aumenta. A diferença de temperaturas, em questão, para o Trocador de Calor 2 com vazão de 2500 ml/min é menor que 0,1 °C quando a vazão no tubo é menor que 15,0 ml/min, ou seja, a temperatura no casco do Trocador de Calor 2, para esta condição, é aproximadamente constante. Isto significa que o fluido do casco perde pouco calor e a sua temperatura se mantém aproximadamente constante.

Pode-se concluir, a partir das Figura 15 e Figura 16, que, quando a vazão do fluido no casco do Trocador de Calor 2 é de 2500 ml/min a temperatura do fluido na saída do tubo é aproximadamente igual à temperatura do fluido que escoava pelo casco. O equilíbrio térmico entre os fluidos ocorre quando a vazão do fluido no tubo é menor que 10,0 ml/min e a sua temperatura é maior que 15,0 °C na entrada do tubo do Trocador de Calor.

4.5 Validação do Modelo e Resultados Experimentais

A validação do modelo do Trocador de Calor foi realizada com o intuito de verificar se o funcionamento dos Trocadores de Calor construídos é condizente com as simulações realizadas com o modelo.

Para a validação do modelo, foram comparados os valores teóricos obtidos com base no Simulador e dados experimentais obtidos com os Trocadores de Calor construídos.

Para a aquisição dos dados experimentais, foram utilizados: a Placa de aquisição e controle e um computador para receber as informações da Placa e salvá-las. A Placa possui um mostrador que indica os parâmetros medidos. O programa para coleta de dados, utilizando o computador, encontra-se no Anexo 5, designado Arquivo para Coleta de Dados.

Os experimentos para coleta de dados foram realizados tomando por base o esquema da Figura 1, porém, com a diferença de que foi utilizado um Controlador de temperatura On-Off para manter a temperatura do Tanque próxima de 37,0°C. Para medir a temperatura da solução na saída do tubo do Trocador de Calor, foi utilizado um sensor com incerteza de 0,2°C e constante de tempo de 200ms (Anexo 1.4).

A seguir, estão relacionadas as condições dos ensaios de validação do modelo do Trocador de Calor:

- Foram colocados 650 ml de água no Tanque de aquecimento;
- A saída da bomba de água do Tanque foi conectada à entrada do casco do Trocador de Calor utilizando-se uma mangueira. A saída de água do casco do Trocador de Calor foi conectada ao Tanque por outra mangueira, permitindo que a água do Tanque escoasse pelo casco do Trocador de Calor. Sendo assim, a vazão no casco do Trocador de Calor ficou igual à vazão da bomba de água;
- A vazão da bomba de água foi ajustada utilizando-se a Placa de aquisição e controle, conforme a necessidade do experimento;
- A vazão do fluido no tubo do Trocador de Calor foi ajustada por meio da bureta graduada;
- A temperatura do fluido na entrada do tubo do Trocador de Calor foi mantida igual à temperatura ambiente;
- A temperatura do fluido na entrada do tubo do Trocador de Calor foi medida antes do início de cada ensaio, com o mesmo sensor de temperatura do tubo;
- As perdas de calor nas mangueiras de conexão que ligam a bomba de água do Tanque ao casco do Trocador de Calor são desprezíveis, por isso, a temperatura da água na entrada do casco do Trocador de Calor durante os ensaios ficou igual à temperatura da água no Tanque;
- O sensor de temperatura do fluido na saída do tubo do Trocador de Calor e o sensor de temperatura do fluido no Tanque foram amostrados com frequência de 20Hz cada um. Esta frequência foi utilizada com o objetivo de se detectar a resposta dinâmica do Trocador de Calor;
- A temperatura da água no Tanque foi regulada por um Controlador On-Off e setpoint de 37,0 °C.

Foram realizados sete ensaios para a validação do modelo do Trocador de Calor. Em cada experimento, foi alterado um conjunto de parâmetros que interferem no funcionamento do modelo. Na Figura 17, encontra-se um diagrama que representa as entradas e saídas medidas ou manipuladas durante os ensaios de validação do Trocador de Calor.

Figura 17 Diagrama de entradas e saídas para validação do Trocador de Calor

Os parâmetros $Q_c(t)$, $T_{et}(t)$ e L são variáveis de entrada, no entanto, foram mantidos constantes durante cada ensaio realizado. As variáveis $Q_t(t)$ e $T_{ec}(t)$ foram alteradas e observadas durante os ensaios. A temperatura na saída do tubo, $T_{st}(t)$, é a variável de saída que está sendo analisada. Todas as variáveis de entrada e saída foram medidas, com exceção do comprimento L cujo valor é definido pela construção física do Trocador de Calor, em conjunto com o posicionamento do sensor de temperatura do tubo.

Na Tabela 3, encontra-se um resumo dos parâmetros avaliados na validação do Trocador de Calor e os respectivos valores atribuídos em cada ensaio.

Tabela 3 Relação dos experimentos para validação do Trocador de Calor

Ensaio	Trocador de Calor	L (mm)	$Q_c(t)$ (ml/min)	$T_{et}(t)$ (°C)
1	1	170	1909	19,0
2	1	140	2720	19,0
3	1	140	1909	19,0
4	1	140	1569	19,0
5	1	170	2720	17,0
6	1	170	1569	17,0
7	2	300	2500	26,0

Os ensaios de 1 a 6 foram realizados com o Trocador de Calor 1 e o ensaio 7 foi realizado com o Trocador de Calor 2.

Os ensaios 2, 3, e 4 foram realizados com o sensor de temperatura inserido no interior do tubo do Trocador de Calor a 30mm da saída para avaliar a influência do comprimento do tubo no funcionamento do Trocador de Calor. Devido a este posicionamento do sensor de temperatura, o Trocador de Calor funcionou como se o seu tubo tivesse um comprimento de 140mm.

No ensaio 1, foi medido o transitório da temperatura do fluido na saída do tubo do Trocador de Calor. Nos outros ensaios, a temperatura na saída do tubo e a vazão no tubo e no casco do Trocador de Calor foram medidas quando as variáveis se encontravam em regime estacionário.

4.5.1 Resultados do Primeiro ensaio

Este ensaio foi realizado com o Trocador de Calor 1 para verificar a resposta transitória da temperatura do fluido na saída do tubo do Trocador Calor. As condições do experimento estão relacionadas a seguir:

- A temperatura na saída do tubo do Trocador de Calor foi medida com o sensor de temperatura do tubo. A aquisição dos dados deste sensor foi realizada utilizando a Placa de aquisição e controle e um computador;
- A vazão no tubo e a vazão no casco do Trocador de Calor foram medidas quando as mesmas se encontravam em regime estacionário;
- Temperatura do fluido na entrada do tubo do Trocador de Calor: 19,0 °C;
- Vazão no casco do Trocador de Calor: 1909 ml/min;
- Comprimento do tubo do Trocador de Calor: 170mm.
- A vazão no tubo do Trocador de Calor foi mantida em 2,0 ml/min e alterada bruscamente para 13,0 ml/min no instante de tempo 29,5s.

Na Figura 18, encontram-se os resultados obtidos a partir deste ensaio:

Figura 18 Ensaio com $Q_c(t)=1909$ ml/min, $L=140$ mm e $T_{et}(t)=19,0^\circ\text{C}$

A partir da análise da Figura 18, é possível verificar que, para a vazão de 2,0 ml/min, a temperatura dos fluidos na entrada do casco e na saída do tubo do Trocador de Calor são aproximadamente iguais. Quando a vazão é alterada para 13,0 ml/min, a temperatura do fluido na saída do tubo do Trocador de Calor diminui e fica menor que a temperatura do fluido do casco. Na Figura 19, encontra-se a simulação realizada com o Simulador do Trocador de Calor que permite identificar o resultado teórico previsto para este ensaio.

Na Figura 19, encontra-se a simulação de funcionamento do Trocador para condições que permitem avaliar o resultado experimental obtido. O instante de tempo em que ocorre a variação na vazão é o mesmo da Figura 18, para facilitar a análise.

Figura 19 Simulação do primeiro ensaio para $Q_c(t)=1909$ ml/min e $T_{et}(t)=19,0$ °C

Comparando-se as Figuras 18 e 19, é possível verificar que a resposta transitória experimental acompanha a curva obtida, a partir do Simulador do Trocador de Calor.

Na Figura 18, pode-se verificar que, quando a vazão aumenta para 13,0 ml/min, ocorre um transitório na temperatura do fluido na saída do tubo. Após o transitório, a diferença entre a temperatura do fluido na entrada do casco e na saída do tubo do Trocador de Calor em regime estacionário é de 4,8 °C. Na Figura 19, esta diferença é de 4,6°C. Os resultados das duas curvas são próximos e as diferenças podem ser atribuídas ao ruído e incertezas na medida, comprovando a confiabilidade do modelo do Trocador de Calor.

4.5.2 Resultados do Segundo Ensaio

Este ensaio foi realizado com o Trocador de Calor 1, para verificar a influência da vazão no casco e o comprimento do tubo no funcionamento do Trocador de Calor.

As condições de realização deste ensaio estão relacionadas a seguir:

- A temperatura na saída do tubo do Trocador de Calor, a vazão no tubo e a vazão no casco do Trocador de Calor foram medidas quando as mesmas se encontravam em regime estacionário;
- Temperatura do fluido na entrada do tubo do Trocador de Calor: 19,0 °C;
- Vazão no casco do Trocador de Calor: 2720ml/min;

- Comprimento do tubo do Trocador de Calor: 140mm, devido ao posicionamento do sensor.

Os dados obtidos a partir deste ensaio se encontram na Tabela 4, a seguir:

Tabela 4 Resultados do Segundo Ensaio da Validação do Trocador de Calor

Resultados Experimentais				Resultados Teóricos	
T_{ec} (°C)	T_{st} (°C)	Q_t (mil/min)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)	T_{st} (°C)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)
37,2	37,2	2,0	0,0	37,26	0,1
37,4	37,5	3,0	0,1	37,32	-0,1
37,2	36,9	4,0	-0,3	36,87	-0,3
36,7	35,6	5,6	-1,1	35,67	-1,0
37,0	33,8	8,8	-3,2	34,03	-3,0
36,7	32,5	10,4	-4,2	32,84	-3,9
36,9	31,3	12,8	-5,6	31,70	-5,2
37,6	31,5	13,6	-6,1	31,79	-5,8
37,7	30,5	16,0	-7,2	30,74	-7,0

A partir dos resultados deste ensaio, pode-se verificar na Tabela 4 que a temperatura no casco do Trocador de Calor variou devido ao Controlador On-Off utilizado. Esta variação foi proposital, pois o objetivo era avaliar o comportamento do modelo em relação às mudanças na temperatura. O valor teórico da temperatura na saída do tubo do Trocador de Calor foi obtido através de simulações. Estas simulações foram realizadas para a temperatura do fluido na entrada do casco igual aos valores experimentais da Tabela 4.

Utilizando as informações da Tabela 4, foram traçados os gráficos da Figura 20.

Figura 20 Ensaio com $Q_c(t)=2720$ ml/min, $L=140$ mm e $T_{et}(t)=19,0^{\circ}\text{C}$

A partir dos resultados deste ensaio, Figura 20, pode-se verificar que a temperatura na saída do tubo Trocador de Calor diminui quando a vazão da solução no tubo aumenta. Outra verificação é que o fluido do tubo do Trocador de Calor não atinge o equilíbrio térmico com o fluido do casco do Trocador de Calor para vazões no tubo acima de 3,0 ml/min, ou seja, a temperatura do fluido na saída do tubo fica muito distante da temperatura do fluido na entrada do casco do Trocador de Calor.

4.5.3 Resultados do Terceiro Ensaio

Este ensaio é semelhante ao segundo, no entanto, a vazão do fluido no casco do Trocador de Calor foi reduzida. Variou-se também a vazão do fluido no tubo e a temperatura do fluido na entrada do casco do Trocador de Calor. As condições do ensaio são:

- A temperatura na saída do tubo do Trocador de Calor, a vazão no tubo e a vazão no casco do Trocador de Calor foram medidas quando as mesmas se encontravam em regime estacionário;
- Temperatura do fluido na entrada do tubo do Trocador de Calor: 19,0 °C;
- Vazão no casco do Trocador de Calor: 1909 ml/min;
- Comprimento do tubo do Trocador de Calor: 140mm, devido ao posicionamento do sensor.

Os dados obtidos a partir deste ensaio se encontram na Tabela 5, a seguir:

Tabela 5 Resultados do Terceiro Ensaio da Validação do Trocador de Calor

Experimental				Teórico	
T_{ec} (°C)	T_{st} (°C)	Q_t (ml/min)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)	T_{st} (°C)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)
36,8	36,7	2,4	-0,1	36,80	0,0
37,2	36,7	4,0	-0,5	36,88	-0,3
37,1	36,1	4,4	-1,0	36,63	-0,5
36,9	33,9	8,0	-3,0	34,45	-2,5
36,8	32,8	10,0	-4,0	33,16	-3,6
37,0	31,2	12,0	-5,8	32,20	-4,8
37,3	30,9	14,0	-6,4	31,40	-5,9
36,8	29,6	17,2	-7,2	29,72	-7,1

A partir dos resultados deste ensaio, pode-se verificar, na Tabela 5, que a temperatura na saída do tubo do Trocador de Calor para a vazão de 4,0 ml/min ficou 0,5°C abaixo da temperatura do fluido na entrada do casco do Trocador de Calor. Comparando os resultados deste ensaio com os do segundo ensaio, é possível verificar que a vazão no tubo que provoca o equilíbrio térmico entre os fluidos do tubo do casco do Trocador de Calor foi reduzida.

Utilizando as informações da Tabela 5, foram traçados os gráficos da Figura 21.

Figura 21 Ensaio com $Q_c(t)=1909$ ml/min, $L=140$ mm e $T_{et}(t)=19,0^{\circ}\text{C}$

Verifica-se que, ao reduzir a vazão do fluido no casco do Trocador de Calor, a vazão máxima do fluido no tubo, que provoca o equilíbrio térmico entre os fluidos do tubo e do casco do Trocador de Calor, também é reduzida.

4.5.4 Resultados do Quarto Ensaio

Este ensaio é semelhante ao segundo e ao terceiro ensaios, no entanto, a vazão no casco do Trocador de Calor foi reduzida ainda mais. Variou-se a vazão no tubo e a temperatura na entrada do casco do Trocador de Calor. As condições do ensaio são:

- A temperatura na saída do tubo do Trocador de Calor, a vazão no tubo e a vazão no casco do Trocador de Calor foram medidas quando as mesmas se encontravam em regime estacionário;
- Temperatura do fluido na entrada do tubo do Trocador de Calor: $19,0^{\circ}\text{C}$;

- Vazão no casco do Trocador de Calor: 1569 ml/min;
- Comprimento do tubo do Trocador de Calor: 140mm, devido ao posicionamento do sensor.

Os dados obtidos a partir deste ensaio se encontram na Tabela 6, a seguir:

Tabela 6 Resultados do Quarto Ensaio da Validação do Trocador de Calor

Experimental				Teórico	
T_{ec} (°C)	T_{st} (°C)	Q_t (ml/min)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)	T_{st} (°C)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)
37,0	37,2	1,6	0,2	37,05	0,1
36,8	37,0	2,0	0,2	36,87	0,1
36,7	36,1	4,0	-0,6	36,40	-0,3
36,8	34,5	6,8	-2,3	35,10	-1,7
36,8	34,2	8,0	-2,6	34,37	-2,4
36,7	33,4	8,8	-3,3	33,80	-2,9
36,7	33,5	10,0	-3,2	33,09	-3,6

Utilizando as informações da Tabela 6, foram traçados os gráficos da Figura 22.

Figura 22 Ensaio com $Q_c(t)=1569$ ml/min, $L=140$ mm e $T_{et}(t)=19,0^{\circ}\text{C}$

A partir dos resultados deste quarto ensaio, pode-se reafirmar as conclusões obtidas no terceiro ensaio. Ao reduzir a vazão do fluido no casco do Trocador de Calor, a vazão máxima do fluido no tubo também deve ser reduzida para que ocorra o equilíbrio térmico entre os fluidos do casco e do tubo do Trocador de Calor.

4.5.5 Resultados do Quinto Ensaio

Neste ensaio, o sensor de temperatura do tubo foi posicionado na saída do tubo do Trocador de Calor e manteve-se a mesma vazão no casco do segundo ensaio. A temperatura do fluido na entrada do tubo foi reduzida em relação ao segundo ensaio.

As condições do ensaio são:

- A temperatura na saída do tubo do Trocador de Calor, a vazão no tubo e a vazão no casco do Trocador de Calor foram medidas quando as mesmas se encontravam em regime estacionário;
- Temperatura do fluido na entrada do tubo do Trocador de Calor: $17,0^{\circ}\text{C}$;

- Vazão no casco do Trocador de Calor: 2720 ml/min;
- Comprimento do tubo do Trocador de Calor: 170mm.

Os dados obtidos a partir deste ensaio, encontram-se na Tabela 7, a seguir:

Tabela 7 Resultados do Quinto Ensaio da Validação do Trocador de Calor

Experimental				Teórico	
T_{ec} (°C)	T_{st} (°C)	Q_t (ml/min)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)	T_{st} (°C)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)
37,2	37,4	1,6	0,2	37,21	0,0
37,3	37,4	2,0	0,1	37,34	0,0
37,4	37,5	2,4	0,1	37,47	0,1
37,1	36,9	4,0	-0,2	36,96	-0,1
36,8	36,7	4,8	-0,1	36,46	-0,3
37,4	37,2	5,2	-0,2	36,92	-0,5
37,3	36,4	6,0	-0,9	36,50	-0,8
37	35,9	7,2	-1,1	35,64	-1,4
37,2	34,9	8,4	-2,3	35,17	-2,0
37,2	35,3	9,2	-1,9	34,72	-2,5
37	34,4	9,6	-2,6	34,32	-2,7
36,9	32,7	12,8	-4,2	32,48	-4,4

Utilizando as informações da Tabela 7, foram traçados os gráficos da Figura 23.

Figura 23 Ensaio com $Q_c(t)=2720$ ml/min, $L=170$ mm e $T_{et}(t)=17,0^{\circ}\text{C}$

Com o aumento do comprimento L , a vazão máxima do fluido do tubo do Trocador de Calor, que provoca o equilíbrio térmico entre os fluidos do casco e do tubo do Trocador de Calor, também aumenta. Com o comprimento de 170mm, o equilíbrio térmico ocorre para a vazão no tubo de 4,0 ml/min, resultado que não era obtido no segundo ensaio pois o equilíbrio térmico ocorria para vazões no tubo de no máximo de 3,0 ml/min.

4.5.6 Resultados do Sexto Ensaio

Este ensaio é semelhante ao quinto, no entanto, a vazão no casco do Trocador de Calor foi reduzida. As condições do ensaio são:

- A temperatura na saída do tubo do Trocador de Calor, a vazão no tubo e a vazão no casco do Trocador de Calor foram medidas quando as mesmas se encontravam em regime estacionário;
- Temperatura do fluido na entrada do tubo do Trocador de Calor: $17,0^{\circ}\text{C}$;
- Vazão no casco do Trocador de Calor: 1569 ml/min;

- Comprimento do tubo do Trocador de Calor: 170mm.

Os dados obtidos a partir deste ensaio, encontram-se na Tabela 8, a seguir:

Tabela 8 Resultados do Sexto Ensaio da Validação do Trocador de Calor

Experimental				Teórico	
T_{ec} (°C)	T_{st} (°C)	Q_t (mil/min)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)	T_{st} (°C)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)
37,2	37,2	2,4	-0,0	37,29	0,1
36,8	36,8	2,8	-0,0	36,81	-0,0
37,3	37,2	3,0	-0,1	37,30	-0,0
37,5	36,7	4,8	-0,8	37,18	-0,3
37,1	35,3	6,4	-1,8	36,15	-0,9
36,7	33,6	9,2	-3,1	34,31	-2,4
37,1	31,8	12,8	-5,3	32,66	-4,4

Utilizando as informações da Tabela 8, foram traçados os gráficos da Figura 24.

Figura 24 Ensaio com $Q_c(t)=1569$ ml/min, $L=170$ mm e $T_{et}(t)=17,0^\circ\text{C}$

Verifica-se que, mesmo com o comprimento de 170mm do tubo, a redução na vazão do fluido no casco do Trocador de Calor ocasiona a diminuição da vazão máxima do fluido do tubo. O equilíbrio térmico entre os fluidos do tubo e do casco do Trocador de Calor, neste ensaio, somente ocorre para vazões no tubo menores que 4,0 ml/min.

4.5.7 Resultados do Sétimo Ensaio

Este ensaio foi realizado com o Trocador de Calor 2 para avaliar a influência das alterações construtivas no seu funcionamento, em relação ao Trocador de Calor 1.

As condições do ensaio são:

- A temperatura na saída do tubo do Trocador de Calor, a vazão no tubo e a vazão no casco do Trocador de Calor foram medidas quando as mesmas se encontravam em regime estacionário;
- Temperatura do fluido na entrada do tubo do Trocador de Calor: $26,0^\circ\text{C}$;
- Vazão no casco do Trocador de Calor: 2500 ml/min;

- Comprimento do tubo do Trocador de Calor: 300mm.

Os dados obtidos a partir deste ensaio, encontram-se na Tabela 9, a seguir:

Tabela 9 Resultados do Sétimo Ensaio da Validação do Trocador de Calor

Experimental				Teórico	
T_{ec} (°C)	T_{st} (°C)	Q_t (ml/min)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)	T_{st} (°C)	$T_{st} - T_{ec}$ (°C)
37,8	37,8	1,6	0,0	37,82	0,0
38,1	38,1	2,0	0,0	38,10	0,0
37,9	37,9	3,2	0,0	37,91	0,0
37,8	37,7	4,0	-0,1	37,77	0,0
37,8	37,7	4,0	-0,1	37,77	0,0
37,8	37,7	8,0	-0,1	37,76	0,0
37,8	37,7	8,8	-0,1	37,75	0,0
37,7	37,7	9,2	0,0	37,64	-0,1
37,7	37,7	10,0	0,0	37,63	-0,1
37,7	37,7	10,8	0,0	37,61	-0,1
37,7	37,7	12,0	0,0	37,58	-0,1
37,6	37,6	12,8	0,0	37,46	-0,1
37,8	37,7	14,0	-0,1	37,60	-0,2
37,8	37,7	15,2	-0,1	37,54	-0,2
37,8	37,6	16,0	-0,1	37,49	-0,3
37,6	37,4	16,4	-0,1	37,28	-0,3
37,7	37,4	18,0	-0,2	37,26	-0,4
37,6	37,1	20,0	-0,4	37,01	-0,5

Verifica-se, na Tabela 9, que o equilíbrio térmico entre os fluidos do tubo e do casco do Trocador de Calor ocorre para uma vazão no tubo abaixo de 12,8 ml/min.

Utilizando as informações da Tabela 9, foram traçados os gráficos da Figura 25.

Figura 25 Trocador 2 com $Q_c(t)=2500$ ml/min, $L=300$ mm e $T_{et}(t)= (t)26,0$ °C

Com o aumento do comprimento e diâmetros interno e externo do tubo do Trocador de Calor, a vazão máxima do fluido do tubo, que provoca o equilíbrio térmico entre os fluidos do tubo e do casco, aumentou.

4.5.8 Conclusões Baseadas nos Ensaios

A validação do Modelo foi realizada com o objetivo de observar o comportamento dos Trocadores de Calor quando submetidos a condições de funcionamento que influenciam no valor da temperatura do fluido na saída do tubo.

O funcionamento do Trocador de Calor é influenciado pela variação das entradas e características construtivas relacionadas a seguir:

- Comprimento e diâmetro do tubo;
- Temperatura de entrada do fluido no tubo;
- Temperatura de entrada do fluido no casco;
- Vazão no tubo;
- Vazão no casco.

As conclusões obtidas a partir dos resultados dos ensaios e dados teóricos obtidos com o Simulador estão relacionadas a seguir:

- A resposta transitória dos Trocadores de Calor construídos pode ser determinada a partir do Simulador;
- A temperatura do fluido na saída do tubo Trocador de Calor diminui quando a vazão do mesmo aumenta;
- Reduzindo a vazão do fluido no casco do Trocador de Calor, a vazão máxima do fluido do tubo do Trocador de Calor, que provoca o equilíbrio térmico entre os fluidos do tubo e do casco do Trocador de Calor, também é reduzida;
- Ao aumentar o comprimento e diâmetros interno e externo do tubo, eleva-se a vazão máxima do fluido do tubo do Trocador de Calor que causa o equilíbrio térmico entre os fluidos do casco e do tubo;
- Os valores dos coeficientes globais de troca de calor utilizados nas simulações são coerentes porque os resultados experimentais e teóricos são aproximadamente iguais;
- O equilíbrio térmico entre o fluido do tubo e do casco ocorre no Trocador de Calor 1 para vazões no tubo de no máximo 4,0 ml/min e no Trocador de Calor 2 para vazões de no máximo 10,0 ml/min.

5 CONTROLADOR

Um dos objetivos deste trabalho foi desenvolver um Controlador eletrônico digital que pudesse ser utilizado no controle da temperatura de uma solução Biomédica. O Controlador é parte integrante do Sistema apresentado no início da dissertação. Este capítulo versa sobre o desenvolvimento do Controlador e os resultados obtidos na fase de implementação.

O Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) foi o escolhido para ser utilizado no Sistema de controle, devido à sua tradição e popularidade. Este tipo de Controlador é aplicado na indústria para resolver problemas de controle de processos com uma entrada e uma saída. Segundo entrevista realizada com Dennis Bernstein, editor chefe da revista IEEE Control Systems Magazine, a justificativa para inclusão do Controlador PID na capa da revista é: “O Controlador PID é uma das poucas idéias que as pessoas recordam de um curso de controle e este tipo de controlador é muito utilizado na indústria. De fato, o Controlador PID é um dos que possuem forte relação entre o campo de pesquisas acadêmicas e uso industrial” (BERNSTEIN, 2006, p. 27).

O Controlador PID possui uma padronização definida pela organização ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society) que fornece as equações que modelam o seu funcionamento.

A implementação do Controlador realizada neste trabalho, baseia-se no formato e equações padronizados pela ISA (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1994). Algumas características da implementação do Controlador foram obtidas em ÅSTRÖM; WITTENMARK (1997), para eliminação de problemas com os termos integral e derivativo. O termo integral possui um mecanismo designado anti Windup, no qual, a saturação do Atuador é considerada no algoritmo. O ganho do termo derivativo é limitado em altas frequências, minimizando os efeitos indesejados causados pelo ruído presente no sinal medido.

Para avaliar o funcionamento do Controlador, foi desenvolvido um Simulador no programa Simulink utilizando-se o modelo do Controlador PID padronizado pela ISA. O Simulador permite verificar o funcionamento do Controlador e realizar a sintonia dos seus parâmetros antes da realização de testes com o Sistema real de controle.

Foi utilizado um microcontrolador cujo software foi desenvolvido em Linguagem C para a implementação do Controlador PID.

5.1 Modelo do Controlador

O modelo do Controlador PID pode ser descrito pela seguinte equação no domínio do tempo contínuo (ÅSTRÖM; WITTENMARK, 1997):

$$u(t) = K \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int^t e(s) \cdot ds + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5-1)$$

Onde:

- $u(t)$: a saída de controle;
- $e(t)$: erro de controle. Considerando a ação reversa de controle, o erro é a diferença entre o setpoint $r(t)$ e a saída medida do processo $y(t)$;
- K : constante de ganho proporcional;
- T_i : tempo do termo integral em segundos;
- T_d : tempo do termo derivativo em segundos.

A equação do Controlador PID no domínio S de Laplace é:

$$U(s) = K \cdot \left[E(s) + \frac{1}{s \cdot T_i} \cdot E(s) + s \cdot T_d \cdot E(s) \right] \quad (5-2)$$

Onde:

- $E(s)$: transformada de Laplace do sinal de erro do Controlador;
- $U(s)$: transformada de Laplace do sinal de saída do Controlador.

Para limitar o ganho da derivada em altas frequências no valor N , faz-se a seguinte aproximação:

$$s \cdot T_d \approx \frac{s \cdot T_d}{1 + s \cdot T_d / N} \quad (5-3)$$

Com a limitação do ganho, a expressão do controle muda para:

$$U(s) = K \cdot \left[E(s) + \frac{1}{s \cdot T_i} \cdot E(s) + \frac{s \cdot T_d}{1 + s \cdot T_d / N} \cdot E(s) \right] \quad (5-4)$$

A equação do Controlador PID no formato ISA é (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1994):

$$U(s) = K \cdot \left\{ b \cdot R(s) - Y(s) + \frac{1}{s \cdot T_i} \cdot [R(s) - Y(s)] + \frac{s \cdot T_d}{1 + s \cdot T_d / N} \cdot [c \cdot R(s) - Y(s)] \right\} \quad (5-5)$$

Onde:

- b : multiplicador do setpoint do termo proporcional;
- c : multiplicador do setpoint do termo derivativo;
- $R(s)$: transformada de Laplace do setpoint do Controlador;
- $Y(s)$: sinal de saída medido do processo no domínio de Laplace.

O Controlador implementado utiliza o formato padronizado pela ISA onde o termo c da equação 5-5 é igual a 0, para que a derivada seja calculada somente com o valor medido no processo.

As equações do Controlador PID no formato ISA discretizado, relacionadas a seguir, foram obtidas por meio da discretização do tempo (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1994):

- Termo proporcional:

$$P(n) = K \cdot [b \cdot R(n) - Y(n)] \quad (5-6)$$

- Termo integral:

$$I(n+1) = \frac{K \cdot T}{T_i} \cdot [R(n) - Y(n)] + I(n) \quad (5-7)$$

- Termo diferencial:

$$D(n) = \frac{T_d}{T_d + N \cdot T} \cdot D(n-1) + c \cdot \frac{K \cdot T_d \cdot N}{T_d + N \cdot T} \cdot [R(n) - R(n-1)] - \frac{K \cdot T_d \cdot N}{T_d + N \cdot T} \cdot [Y(n) - Y(n-1)] \quad (5-8)$$

- Saída do Controlador $V(n)$ é calculada somando-se os termos anteriores:

$$V(n) = P(n) + I(n) + D(n) \quad (5-9)$$

Onde:

- T : período de amostragem;
- n : tempo discreto;
- $R(n)$: setpoint do Controlador discretizado;
- $Y(n)$: sinal de saída discretizado medido do processo.

A saída do Controlador $U(n)$ é limitada pela saturação do Atuador, cujos valores admissíveis variam entre u_{low} e u_{high} , conforme a regra:

$$U(n) = \begin{cases} u_{low} & se \quad V(n) < u_{low} \\ V(n) & se \quad u_{low} \leq V(n) \leq u_{high} \\ u_{high} & se \quad V(n) > u_{high} \end{cases} \quad (5-10)$$

Devido à saturação do Atuador, utiliza-se a técnica do anti Windup no termo integral. Tal procedimento evita que o Controlador continue integrando o sinal quando o Atuador está saturado, o que levaria o Sistema por ele controlado a operar como se estivesse em malha aberta (ÅSTRÖM; WITTENMARK, 1997). A equação do termo integral com anti Windup no domínio de Laplace é:

$$I(s) = \frac{1}{s} \left[K \cdot \frac{R(s) - Y(s)}{T_i} + \frac{U(s) - V(s)}{T_i} \right] \quad (5-11)$$

Onde:

- T_i : é a constante de tempo (Tracking time) do anti Windup.

Fazendo-se a discretização do temo integral com anti Windup:

$$I(n+1) = T \cdot \left[K \cdot \frac{R(n) - Y(n)}{T_i} + \frac{U(n) - V(n)}{T_i} \right] + I(n) \quad (5-12)$$

O Controlador implementado utiliza as equações: 5-12 para o cálculo do termo integral, 5-6 para o termo proporcional, 5-8 para o termo derivativo e 5-10 para o cálculo da saída de controle.

5.2 Simulador do Controlador

O Simulador do Controlador PID foi desenvolvido no programa Simulink, a partir das equações do modelo discretizado.

O diagrama do Simulador se encontra representado na Figura 26.

Figura 26 Simulador do Controlador PID

O Simulador possui duas entradas e uma saída, sendo a primeira entrada o sinal de referência do Controlador, a segunda entrada o valor medido da variável que se deseja controlar e a saída do modelo é a variável de controle.

O Simulador possui o mecanismo de anti Windup no termo integral.

O termo derivativo é calculado com o valor medido no processo e por este motivo o Simulador possui a segunda entrada.

No Simulador foram utilizadas as seguintes constantes: b , b_i , b_t , b_d , a_d e K_c . Estas constantes foram obtidas a partir do modelo do Controlador apresentado anteriormente e calculadas utilizando o programa Matlab cujo arquivo se encontra no Anexo 5.3, designado Arquivo para Simulador do Controlador PID.

5.3 Implementação

A partir do modelo do Controlador, foi realizada a sua implementação com o uso da Placa de aquisição e controle (Anexo 2). Esta placa possui um processador de dados eletrônico, denominado microcontrolador, que foi utilizado na execução de três funções básicas do Controlador PID:

- Aquisição do sinal de entrada;
- Processamento do algoritmo;
- Atualização da saída do Controlador.

O microcontrolador necessita de que sua memória seja carregada com um programa para ele execute as funções desejadas. Por este motivo, foi desenvolvido um programa em Linguagem C, para implementação das funções do Controlador PID.

Escolheu-se o microcontrolador modelo PIC18F452 (MICROCHIP, 2002) devido à sua versatilidade e disponibilidade de ferramentas para o desenvolvimento do projeto. Este componente é um processador de dados de 8 bits com velocidade máxima de 40 MIPS (Milhões de instruções por segundo) de processamento e possui periféricos internos para conversão analógico-digital, comunicação serial, contagem de tempo e interrupções.

5.3.1 Ferramentas de desenvolvimento

A conversão do programa em Linguagem C para a linguagem de máquina do microcontrolador foi executada com o compilador PCH Compiler for PIC18F do fabricante CCS Inc. Este compilador está disponível no site do fabricante www.ccsinfo.com. O compilador CCS foi utilizado devido ao seu baixo custo e literatura disponível sobre o compilador (PEREIRA, 2002). A linguagem de máquina é o formato pelo qual o programa convertido pode ser gravado na memória do microcontrolador. O programa convertido utiliza as instruções disponíveis no PIC18F452.

Utilizou-se o ambiente de desenvolvimento MPLAB IDE do fabricante Microchip na simulação e gravação do programa na memória do microcontrolador. Este ambiente de desenvolvimento é gratuito e está disponível no site do fabricante www.microchip.com.

5.3.2 Características da implementação

O microcontrolador, além de ser utilizado na implementação do Controlador, também foi aplicado na realização de outras funcionalidades do Sistema, como por exemplo, a implementação do Atuador de controle, comunicação serial da Placa com o computador, interface com usuário incluindo varredura de teclado e atualização de display. Apesar de executar todas estas tarefas, não foi utilizado nenhum Sistema Operacional em tempo real na implementação do Controlador PID.

A garantia da execução do algoritmo do Controlador em tempo real se deve à forma pela qual o programa foi estruturado. Usando um relógio de software formado por um temporizador e uma interrupção disponíveis no microcontrolador, as tarefas prioritárias do programa foram executadas na interrupção e as de menor prioridade, no programa principal.

A vantagem de se utilizar um Sistema proprietário para o gerenciamento das tarefas sem o uso de um Sistema operacional é a redução dos custos do produto final.

A frequência de amostragem do sinal de entrada do Controlador PID foi ajustada através da interrupção, com a finalidade de estabelecer o instante em que é realizada a aquisição do sinal de entrada e a execução do seu algoritmo. A interrupção garante que a execução do algoritmo ocorra em tempo real, sem variações na frequência de amostragem.

Todos os cálculos do algoritmo do Controlador PID foram realizados com variáveis do tipo ponto flutuante, evitando problemas numéricos que poderiam interferir no seu funcionamento. Para a implementação dos cálculos, foram utilizadas funções da Linguagem C para aritmética em ponto flutuante, pois o microcontrolador possui somente instruções aritméticas para cálculos com variáveis de 8 bits, o que não seria suficiente para a aplicação. Os números das rotinas de ponto flutuante possuem 32 bits, sendo 1 bit de sinal, 8 bits de expoente e 23 bits de mantissa.

A desvantagem de se utilizar rotinas para aritmética em ponto flutuante é o aumento do tempo de execução do algoritmo do Controlador.

O tempo que o Controlador desenvolvido em Linguagem C leva para realizar a aquisição do sinal de entrada, executar o algoritmo do Controlador e atualizar a sua saída é menor que 1 ms. Este intervalo de tempo é conhecido como atraso computacional.

O atraso computacional encontrado neste trabalho é pequeno quando comparado ao período de amostragem do Controlador que foi adotado para forçar uma relação entre o período de amostragem e o atraso computacional maior que 50 vezes. Esta relação garante que o atraso computacional não interfira no funcionamento do Controlador.

A implementação do Controlador PID foi realizada conforme Figura 27, a seguir.

Figura 27 Diagrama da implementação do Controlador PID

Para medir a saída do processo, foi utilizado um sensor cujo sinal fornecido passa por um filtro passa baixas analógico para atenuação dos sinais de alta frequência e eliminação do efeito Aliasing. Foram utilizados dois valores distintos de frequência de corte no filtro:

- 10 Hz durante a validação do Controlador descrita no Anexo3;
- 2 Hz para a implementação do Controlador de temperatura, conforme descrito no Capítulo 6.

Após a etapa de filtragem, o sinal do sensor é medido utilizando-se o conversor analógico-digital disponível no microcontrolador que possui 10 bits de resolução. O valor obtido com a conversão analógico-digital do sinal de entrada passa por uma etapa de conversão de número inteiro para ponto flutuante, a fim de que todos os cálculos do Controlador possam ser efetuados em ponto flutuante.

O sinal de entrada medido sofre um acerto de escala denominado Scaling da entrada. Isto foi realizado como objetivo de converter o número fornecido pelo conversor

analógico digital, que varia de 0 a 1023, para outra faixa. Foram realizados dois acertos de escala descritos a seguir:

- Na etapa de validação do Controlador, descrita no Anexo 3, o número fornecido pelo conversor analógico digital foi convertido para -512 e 512;
- Na etapa de utilização do Controlador para realimentar o Sistema de Controle de temperatura, conforme descrito no Capítulo 6, o número fornecido pelo conversor analógico digital foi convertido para 0,0°C e 70,0°C. Esta conversão utiliza a equação A1-2 que relaciona o sinal elétrico do sensor com a temperatura.

O algoritmo do Controlador PID é executado para obtenção do valor da saída de controle, utilizando o sinal de setpoint e o valor medido do processo.

O valor da saída de controle sofre um acerto de escala denominado Scaling da saída, o qual converte o número da saída do Controlador para outra faixa descrita a seguir, de forma que possa ser utilizada pelo Atuador:

- Na etapa validação do Controlador (Anexo 3), a saída do Controlador, que varia entre -512 e +511, é convertida para 0 a 1023;
- Na etapa de utilização do Controlador para realimentar o Sistema de Controle de temperatura (Capítulo 6), a saída do Controlador, que varia entre 0 e 425, é convertida para 0 a 100.

Após realizar o Scaling da saída, o valor de controle é convertido de ponto flutuante para inteiro.

O Atuador utiliza o sinal do Controlador para corrigir o Processo.

Na Figura 28, encontra-se a representação simplificada do fluxo de eventos da implementação do algoritmo do Controlador.

Figura 28 Fluxo de eventos do algoritmo do Controlador PID

O fluxo de eventos do algoritmo do Controlador PID foi utilizado no desenvolvimento do programa em Linguagem C do microcontrolador.

O código fonte do microcontrolador para a implementação do Controlador PID se encontra no Anexo 4.

5.4 Validação do Controlador

O Controlador é parte integrante do Sistema de controle, por isso, é importante que o seu funcionamento seja avaliado separadamente, antes da sua inclusão no Sistema completo. Desta forma, com o objetivo de detectar problemas durante o desenvolvimento e garantir o seu correto funcionamento, foi realizada a validação do Controlador.

A validação foi realizada com o emprego de um gerador de sinais ligado à entrada do Controlador, utilizando sinais do tipo onda quadrada e triangular, com o objetivo de avaliar o seu comportamento quando submetido a sinais do tipo degrau e rampa. Os valores medidos nas entradas e saída do Controlador foram enviados para um computador. Com os valores coletados, foi possível avaliar o funcionamento do Controlador comparando-se os resultados experimentais com os teóricos obtidos com o Simulador. Os resultados da validação realizada se encontram no Anexo 3.

A partir da validação do Controlador, pode-se concluir que os resultados experimentais (Anexo 3) condizem com os valores teóricos obtidos com o Simulador.

A validação do Controlador, a partir de um gerador de sinais, permite avaliar o funcionamento do Controlador independente do processo. Desta forma, quando o Controlador for utilizado no Sistema de controle, o seu funcionamento não será duvidoso.

6 SISTEMA DE CONTROLE

Nos capítulos anteriores, foram apresentados os modelos e validações de cada um dos três elementos principais que constituem o Sistema de controle de temperatura, que são: Trocador de Calor, Tanque e Controlador.

Neste capítulo, o objetivo é apresentar:

- O estudo realizado para controlar a temperatura da solução Biomédica utilizando os três elementos citados acima;
- O funcionamento do Sistema de controle de temperatura construído e sua validação.

Este capítulo relata a implementação realizada com base nas características de funcionamento do Sistema de controle descritas no Capítulo 2.

6.1 Atuador

O Atuador é um dos elementos que constituem o Sistema de controle de temperatura. O Atuador é formado por um conjunto de componentes eletrônicos destinados à conversão do sinal disponível na saída do Controlador, em um sinal elétrico utilizado no acionamento de mecanismos que causem efeito desejado no Sistema.

Neste trabalho, o Atuador tem a finalidade de converter o sinal de saída do Controlador, que é digital e varia de 0 a 100, em um sinal elétrico com potência suficiente para acionar uma resistência de aquecimento.

O elemento principal do Atuador em questão é o Triac. Este componente eletrônico funciona como uma chave que, quando conectada em série com a resistência de aquecimento, permite controlar o instante em que a mesma é ligada.

Para a implementação do Atuador, montou-se um circuito eletrônico de sincronismo com a rede elétrica e controle do ângulo de disparo do Triac (Anexo 2).

Foi desenvolvido um programa em Linguagem C que controla o ângulo de disparo do Triac, tornando possível o controle da potência entregue à resistência.

Na Figura 29, encontra-se a representação do controle do ângulo de condução do Triac.

Figura 29 Representação do controle do ângulo de disparo do Triac

No instante representado pelo ângulo α , o Triac é disparado e começa a conduzir corrente elétrica que alimenta a resistência. O Triac continua alimentando a resistência até o ângulo π , quando a tensão da rede elétrica passa por zero volts. No semiciclo de tensão negativa, ocorre o mesmo processo descrito. Pode-se observar que, quanto menor é o ângulo α , maior será a potência entregue à resistência.

A equação que permite relacionar o ângulo de disparo com a potência entregue à resistência de aquecimento foi obtida em AHMED (2000). A equação fornece a potência normalizada, ou seja, varia de 0 a 100%. A potência normalizada foi escolhida por ser independente do valor de tensão e potência nominal da resistência, ou seja, o Atuador é genérico e pode ser utilizado com qualquer valor de potência e tensão nominais.

$$P_{normalizada} = 100 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4 \cdot \pi}} \quad (6-1)$$

Onde:

- $P_{normalizada}$: potência normalizada;
- α : ângulo de disparo do Triac [rad].

Foram calculados os valores de α para que se tenha 100 níveis de potência. Estes valores foram incluídos no software do microcontrolador como constantes para que não seja necessário recalculá-los sempre que a saída do Controlador seja alterada. Isto foi realizado para reduzir o tempo do processamento e atualizar o Atuador o mais rapidamente possível.

Para controlar o ângulo de disparo do Triac, foram utilizadas duas interrupções: uma para a leitura do sinal de sincronismo com a rede elétrica e outra para contagem do tempo de disparo. Quando o software detecta o momento em que a tensão da rede cruza o zero, inicia-se a contagem do tempo de disparo que é proporcional ao ângulo α . Quando a contagem de tempo termina, o Triac é disparado com um pulso cuja duração varia entre 100 μ s e 300 μ s.

O programa foi desenvolvido para funcionar em 60Hz, ou seja, o ângulo π corresponde a 8,3333ms.

A potência dissipada pela resistência de aquecimento depende da tensão da rede elétrica utilizada para alimentá-la e do valor da sua potência nominal. Neste trabalho, a tensão da rede elétrica utilizada é de 110Vac e a potência da resistência elétrica 425W. Desta forma, o Atuador consegue controlar a potência com resolução de 4,25W.

6.2 Simulador do Sistema de Controle

Utilizando os Simuladores desenvolvidos para o Tanque, Trocador de Calor e Controlador, foi desenvolvido um Simulador para o Sistema de controle.

A representação do Simulador do Sistema de controle se encontra na Figura 30, a seguir.

Figura 30 Simulador do Sistema de controle

Analisando o Simulador do Sistema de controle, pode-se observar as seguintes características:

- Foram ligados geradores nas seguintes entradas: temperatura do fluido na entrada do tubo, vazão no casco e vazão no tubo do Simulador do Trocador de Calor, para que fosse possível variar livremente estes parâmetros;
- Como a vazão do fluido no casco do Trocador de Calor é a mesma da água bombeada do Tanque, um único gerador foi conectado ao Trocador de Calor e ao Tanque;

- Conectou-se a saída da temperatura do Simulador do Tanque à entrada do Trocador de Calor para que a temperatura do fluido na entrada do casco, seja igual à que sai do Tanque;
- Um gerador foi conectado na entrada do Simulador do Tanque para simular as perdas para o ambiente;
- Um gerador, conectado à entrada de referência do Controlador PID, foi utilizado para definir o setpoint do Controlador;
- Para simular o conversor analógico digital, foi utilizado um segurador de ordem 0 na entrada do Controlador PID;
- Um elemento que efetua a quantização foi utilizado na entrada do Controlador para simular os efeitos do número de bits do conversor analógico digital e do Scaling de entrada do Controlador. Este elemento foi configurado para $0,1^{\circ}\text{C}$;
- Um segundo elemento para quantização foi utilizado na saída do Controlador para simular os efeitos do número de bits do Atuador e do Scaling de saída do Controlador. Este elemento foi configurado com 4,25W, pois a potência da resistência de aquecimento é de 425W e o Atuador possui 100 níveis de resolução.

6.3 Sistema Construído

Para a construção do Sistema de controle, foram utilizados componentes desenvolvidos e testados anteriormente: Trocador de Calor, Tanque e Controlador. A Placa de aquisição e controle também foi utilizada na montagem do Sistema.

Nas fotos do Sistema (Figuras 31 e 32), pode-se observar as seguintes características:

- A bureta graduada e o Trocador estão fixados em uma haste metálica por meio de garras;
- A saída da bureta está conectada à entrada do tubo do Trocador de Calor por meio de uma mangueira;
- Na saída do tubo, existe um sensor de temperatura e um cálice de vidro para armazenar o fluido que sai do Trocador de Calor;
- O Tanque está interligado ao casco do Trocador de Calor por duas mangueiras;

A resistência, a bomba de água e os sensores de temperatura foram conectados à Placa de aquisição e controle.

Na Figura 32, encontra-se a foto do processo montado sem a Gaiola de Faraday.

Figura 31 Foto do Sistema de controle

Na Figura 32, encontra-se a foto detalhada do Sistema:

Figura 32 Foto detalhada do Sistema de controle

6.4 Controle de Temperatura

Para o desenvolvimento do controle de temperatura, foi utilizado o Controlador PID.

Para controlar a temperatura de uma solução Biomédica na saída do tubo do Trocador de Calor, as seguintes características do Sistema devem ser observadas:

- O Trocador de Calor 2, permite aquecer uma solução Biomédica de forma que a máxima diferença entre a temperatura do fluido na saída do tubo e a temperatura do fluido no casco do Trocador de Calor 2 é menor que $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ quando a vazão no tubo é menor que $10,0\text{ ml/min}$. Desta forma a temperatura da solução Biomédica atinge o equilíbrio térmico com o fluido do casco;
- Controlando-se a temperatura do fluido no casco, a temperatura do fluido no tubo do Trocador de Calor se manterá controlada para a faixa de vazão desejada;
- A temperatura da solução Biomédica pode ser controlada por meio de um Controlador capaz de manter a temperatura no interior do Tanque no valor pré-estabelecido, para a realização dos Experimentos Biomédicos.

As variáveis utilizadas pelo Controlador no presente trabalho são:

- A temperatura do fluido no interior do Tanque é utilizada pelo Controlador para realimentar o Sistema;
- A potência da resistência de aquecimento é a variável de atuação do Controlador.

A sintonia do Controlador PID foi realizada de forma a minimizar a ocorrência de sobressinal na temperatura do fluido no interior do Tanque, pois a partir do seu modelo apresentado em capítulos anteriores, verifica-se que o resfriamento do Tanque é mais lento que o aquecimento. Como o resfriamento é demorado, o sobressinal deve ser nulo ou muito pequeno para evitar que o Sistema demore muito tempo para atingir o valor de regime de temperatura pré-estabelecido. Como o objetivo é garantir que o Sistema esteja pronto para ser utilizado pelo usuário em no máximo 10 minutos, optou-se por projetar um Controlador sem sobressinal.

Para sintonizar os parâmetros do Controlador, foi utilizada a equação 3-3 que determina o comportamento da temperatura do fluido no interior do Tanque quando é fornecida

uma determinada quantidade de calor ao fluido através da resistência de aquecimento. Este comportamento é característico de um sistema com um pólo na origem, ou seja, um integrador puro como descrito anteriormente no Capítulo 3. A partir desta equação, pode-se determinar o comportamento aproximado do sistema em malha fechada.

A equação do Sistema em malha fechada utilizando um Controlador Proporcional é:

$$\frac{T_s(s)}{R(s)} = \frac{1}{\frac{1}{K_{MF}} \cdot s + 1} \quad (6-2)$$

Onde:

- $K_{MF} = \frac{K}{4,1868 \cdot ro \cdot cp \cdot V}$

A partir da equação 6-2, que é característica de um sistema de primeira ordem, pode-se concluir que o Sistema em malha fechada apresenta ausência de sobressinal.

Foi implementado um Controlador Proporcional cujos parâmetros relacionados a seguir, foram obtidos a partir de simulações realizadas com o Simulador do Sistema de controle:

- Período de amostragem: 0,25s;
- Ganho do Controlador: 100;
- Limitação do Atuador (u_{high}): 425.

Este Controlador Proporcional foi utilizado para controlar a temperatura do fluido no interior do Tanque e, conseqüentemente, controlar a temperatura do fluido na saída do tubo do Trocador de Calor.

Foi implementado um segundo Controlador Proporcional + Integral cujos parâmetros relacionados a seguir, também foram obtidos a partir de simulações realizadas com o Simulador do Sistema de controle:

- Período de amostragem: 0,25s;
- Ganho do Controlador: 500

- Tempo Integral: 250s
- Tempo Derivativo: 0s
- Limitação do Atuador (u_{high}): 425
- Tempo de reset do anti Windup (T_t): $0,9 \cdot T_i$

6.5 Validação do Sistema de Controle

A validação do Sistema de controle foi realizada a partir de experimentos para verificar o seu funcionamento com os Controladores Proporcional (P) e Proporcional+Integral (PI).

Para a obtenção dos resultados experimentais, o seguinte ensaio foi realizado:

- Foram colocados 650ml de água no Tanque;
- A bomba de água foi ligada com potência ajustada para 2500 ml/min;
- O setpoint do Controlador foi programado para 37,0°C;
- Ligou-se o Controlador de temperatura no instante de tempo 25s;
- Os valores do sinal de controle e da temperatura medida com o sensor de temperatura do Tanque (Anexo 1.3), foram enviados para um computador.

O sinal do sensor de temperatura do Tanque foi medido utilizando-se a Placa de aquisição e controle conectada a um computador.

Na Figura 33, encontram-se os resultados deste ensaio para o Controlador Proporcional.

Figura 33 Resultado do Controlador Proporcional

Analisando os resultados do ensaio, é possível observar que a temperatura do fluido no Tanque atinge o valor de setpoint sem sobressinal. Em aproximadamente 200s, a temperatura atinge o valor programado e se mantém em regime estacionário com erro nulo. O sinal de controle se mantém no valor máximo no início do experimento e depois é reduzido e tende a zero. A partir do momento que a temperatura no interior do Tanque atinge o valor do setpoint, pode-se observar que o Controlador mantém a resistência ligada com uma potência próxima de zero, para compensar as perdas de calor do Sistema para o ambiente.

Para avaliar o funcionamento do Sistema com o Controlador PI, foi realizado o mesmo ensaio cujos resultados se encontram na Figura 34.

Figura 34 Resultado do Controlador Proporcional + Integral

Analisando os resultados do ensaio, é possível observar que a temperatura do fluido no Tanque atinge o valor de setpoint sem sobressinal. Em aproximadamente 80s, a temperatura atinge o valor programado e se mantém em regime estacionário com erro nulo.

Os resultados experimentais são aproximadamente iguais aos valores teóricos obtidos com o Simulador do Sistema de controle. Desta forma, pode-se concluir que o Controlador do Sistema está validado e é adequado para ser utilizado.

Para avaliar o aquecimento da solução Biomédica utilizando o Sistema de controle desenvolvido, foi realizado um ensaio com o objetivo de executar a aquisição da temperatura da solução na saída do Trocador de Calor quando se varia a vazão do fluido do tubo do Trocador de Calor 2, conforme descrito a seguir:

- Depois que a temperatura no interior do Tanque atingiu o valor de regime pré-estabelecido conforme Figura 33, iniciou-se o experimento;
- A temperatura ambiente durante o experimento era de 24,9 °C;

- O Controlador Proporcional de temperatura e a bomba de água foram mantidos ligados durante a realização do experimento;
- Um sensor de temperatura (Anexo 1.4) foi colocado na saída do tubo do Trocador de Calor para medir a temperatura do fluido aquecido;
- O valor da temperatura medida foi enviado para um computador utilizando-se a Placa de aquisição e controle;
- A vazão da solução que escoava pelo tubo do Trocador de Calor foi alterada utilizando-se o registro existente na bureta graduada. A variação na vazão foi alterada bruscamente com o objetivo de provocar uma variação do tipo degrau;
- A temperatura do fluido no interior do Tanque foi mantida pelo Controlador em 37,0 °C durante todo o ensaio.

Os resultados deste experimento podem ser observados na Figura 35.

Figura 35 Resultado do Sistema de controle de temperatura

A partir da Figura 35, pode-se observar que no início do experimento a vazão era de 0,5 ml/min e a temperatura do fluido na saída do tubo do Trocador de Calor se manteve em aproximadamente 37,0 °C. A vazão foi alterada para 4,0 ml/min e a temperatura

continuou em aproximadamente 37,0 °C. Em seguida, a vazão foi alterada para 10,0 ml/min e a temperatura continuou aproximadamente no valor pré-estabelecido. Na sequência, a vazão foi alterada para 22,0 ml/min, fora da faixa de trabalho, e a temperatura caiu para aproximadamente 36,3 °C como era previsto no Capítulo 4. A vazão foi reduzida para 13,0 ml/min e a temperatura aumentou para aproximadamente 36,7 °C, ainda fora da faixa de trabalho. Por fim, a vazão foi reduzida para 8,0 ml/min e a temperatura subiu para aproximadamente 37,0 °C.

Mesmo variando livremente a vazão da solução Biomédica dentro da faixa de 0,0 ml/min a 10,0 ml/min, a sua temperatura na saída do Trocador de Calor se manteve aproximadamente igual ao valor pré-estabelecido com o emprego do Controlador.

O Sistema atende aos requisitos impostos no início do trabalho e a solução Biomédica pode ser aquecida utilizando-se o Trocador de Calor 2, Controlador e Tanque construídos. A Tabela 10 resume as seguintes características observadas nas Figuras 33 e 35:

- Após 4 minutos, o Sistema pode ser utilizado para aquecer a solução Biomédica quando é utilizado o Controlador P e 2 minutos com o uso do Controlador PI;
- A vazão da solução pode variar livremente de 0,0 a 10,0 ml/min. O Sistema não mede a vazão da solução;
- A temperatura da solução Biomédica deve ser maior que 15,0°C;
- A temperatura da solução é controlada com incerteza de 0,2 °C;
- Não existe sobressinal na temperatura da solução, ou seja, a sua temperatura não ultrapassa o valor pré-estabelecido pelo Controlador;
- A variação na vazão da solução não provoca mudança na sua temperatura que se mantém no valor pré-estabelecido pelo Controlador;
- A temperatura pode ser programada utilizando-se a Placa de aquisição e controle;
- O Sistema de controle não necessita de sensor para medir a temperatura do fluido na saída do tubo do Trocador de Calor. Isto significa que este Sistema pode ser montado de forma que nenhum componente elétrico esteja no interior da Gaiola de Faraday e, conseqüentemente, não haverá interferência nos Experimentos Biomédicos.

Tabela 10 Comparação do Sistema real com as especificações do projeto

Descrição	Especificação	Sistema real
Tempo para iniciar o Experimento Biomédico	Menor que 10 minutos	Em 4 minutos, o Sistema já pode ser utilizado com o Controlador P ou em 2 minutos com o Controlador PI
Vazão da solução	0,0 a 10,0 ml/min	0,0 a 10,0 ml/min quando a temperatura da solução é maior que 15,0°C
Variação na vazão	Pode variar livremente sem necessidade da sua medição	O Sistema não mede a vazão da solução que pode variar livremente dentro da faixa especificada
Incerteza da temperatura da solução	1,0 °C	0,2 °C
Sobressinal na temperatura da solução	Temperatura da solução não pode ultrapassar 40,0 °C	Não ocorre sobressinal
Variação da temperatura da solução quando a vazão é alterada	Deve ser a menor possível e a temperatura da solução não pode ultrapassar 40,0 °C	A temperatura da solução não é alterada quando a vazão varia dentro da faixa especificada
Seleção da temperatura da solução	Programável de 35,0 a 37,0 °C	O setpoint de temperatura é ajustável pelo teclado
Influência do Sistema de controle no Experimento Biomédico	Não pode ocorrer	Com o uso do Trocador de Calor, o Experimento pode ser realizado no interior da Gaiola de Faraday sem a interferência do Sistema de controle que aquece a solução Biomédica

A partir desta tabela e dos resultados obtidos nos ensaios deste capítulo, pode-se concluir que o Sistema de controle está validado e o seu funcionamento está em conformidade com as simulações realizadas e o Simulador do Sistema de controle.

7 CONCLUSÕES

O Sistema de controle de temperatura proposto, utilizando o Trocador de Calor 2, o Tanque de aquecimento e o Controlador PID, atende ao objetivo de aquecer a solução sem o uso de componentes elétricos no interior da Gaiola de Faraday, permitindo a realização de experimentos com maior confiabilidade nos resultados.

Os modelos do Trocador de Calor, Tanque de aquecimento e Controlador PID desenvolvidos são adequados para avaliar o funcionamento do Sistema de controle e seus componentes.

A validação parcial do modelo de cada componente do Sistema de controle permitiu que a integração dos componentes do Sistema fosse executada com sucesso.

O tubo do Trocador de Calor foi construído com cobre, no entanto, este metal pode reagir quimicamente com alguns dos elementos que constituem a solução Biomédica que se deseja aquecer. Uma alternativa para resolver este problema é a deposição de uma fina camada de ouro sobre o tubo de cobre. As propriedades térmicas do Trocador de Calor sofrerão pequenas alterações e o coeficiente global de troca de calor U será reduzido pois a condutividade térmica do ouro é menor que a do cobre. Outra alternativa é utilizar um tubo de alumínio. Como o coeficiente global de troca de calor U com o alumínio será menor que o do cobre, devido a menor condutividade térmica do alumínio, deve-se aumentar o comprimento do tubo. Para manter as pequenas dimensões do Trocador de Calor, seria necessário alterar as suas características construtivas substituindo o tubo reto do Trocador de Calor por outro em forma espiral. Uma sugestão para trabalhos futuros é a comprovação dos resultados destas propostas.

Para o Controle de temperatura, verificou-se através de simulações e resultados experimentais, que o Controlador Proporcional atende aos requisitos de erro estacionário e dinâmica da temperatura determinados no início do trabalho. Desta forma, seria possível utilizar um Controlador mais simples que o PID para realimentar o Sistema. No entanto, o Controlador PID foi utilizado para permitir que futuras expansões e melhorias, como a troca de componentes e determinação de novas características funcionais do Sistema de controle, possam ser implementadas.

A sintonia do Controlador foi realizada utilizando os simuladores desenvolvidos. Trabalhos futuros podem abordar métodos analíticos de sintonia do Controlador PID.

A1 COMPONENTES DO SISTEMA

A seguir, encontra-se a descrição dos componentes utilizados na construção do Sistema de controle.

A1.1 Bomba de água

Foi utilizada uma bomba de água modelo BCD00123 do fabricante Delphi Automotive Systems do Brasil Ltda.

A seguir, encontra-se a foto da bomba.

Figura 36 Foto da bomba de água

A tensão de alimentação da bomba de água é 12Vdc e vazão máxima de 3000 ml/min.

A bomba possui um filtro na parte inferior para evitar que possíveis partículas de sujeira suspensas na água danifiquem a bomba.

A1.2 Resistência de aquecimento

A seguir, encontra-se a foto da resistência de aquecimento.

Figura 37 Foto da resistência de aquecimento

Foi utilizada uma resistência de aquecimento modelo Corona II 4 temperaturas do fabricante Ducha Corona Ltda.

Esta resistência possui capacidade de dissipação de potência de 425W em 110Vac.

A1.3 Sensor de temperatura do Tanque

O sensor de temperatura do Tanque escolhido é um resistor NTC (Negative Temperature Coefficient). O princípio de funcionamento deste componente é a variação da sua resistência elétrica em função da variação da temperatura. O coeficiente de variação é negativo, ou seja, a sua resistência diminui conforme a temperatura aumenta. A equação que permite relacionar a temperatura com a resistência elétrica do sensor foi obtida em (COGGAN, 1997):

$$R_T = R_N \cdot e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right)} \quad (A1-1)$$

Onde:

- R_N : Resistência nominal do sensor à temperatura T_N [Ω];
- β : Constante do sensor;
- T : Temperatura [K];
- T_N : Temperatura nominal [K];
- R_T : Resistência do sensor à temperatura T [Ω].

O fabricante do sensor é a empresa Betatherm Sensors e o modelo é 10K3MCD1. As características deste sensor são:

- Pequenas dimensões mecânicas: 0,457 mm e 3,18 mm;
- Tolerância de +/-0,2°C a 25°C;
- Constante de Tempo de 200ms;
- Resistência elétrica nominal de 10kΩ a 25°C;
- Coeficiente beta de 0 a 50°C: 3892.

Substituindo os valores, a equação fica:

$$R_T = 10.000 \cdot e^{3892 \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right)} \quad (A1-2)$$

A foto do sensor se encontra na figura a seguir:

Figura 38 Foto do sensor de temperatura

A1.4 Sensor de temperatura do tubo do Trocador de Calor

Este sensor é igual ao sensor de temperatura utilizado para a medição da temperatura do fluido no interior do Tanque.

A1.5 Bureta graduada

Foi utilizada uma bureta graduada modelo Vidro Labor, com capacidade de armazenamento de 50,0 ml do fabricante Labor Quimi Indústria Brasileira. Esta bureta é calibrada para a temperatura de 20°C.

A seguir, encontra-se a foto da bureta.

Figura 39 Foto da bureta graduada

A bureta possui um registro que permite ajustar a vazão do fluido.

A1.6Termômetro de mercúrio com bulbo de vidro

Foi utilizado um termômetro de mercúrio com bulbo de vidro do fabricante Labor.

A seguir, encontra-se a foto do termômetro.

Figura 40 Foto do termômetro

A escala de temperatura do termômetro varia de $-10,0^{\circ}\text{C}$ a $110,0^{\circ}\text{C}$, com incerteza de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Este termômetro foi utilizado para verificar a temperatura do fluido no interior do Tanque no início do trabalho quando ainda não havia sido montada a Placa de aquisição e controle.

A2PLACA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE

A Placa de aquisição e controle desenvolvida utiliza o microcontrolador PIC18F452 (Microchip, 2002).

As características da Placa são:

- Display LCD (Liquid Crystal Display) de 2 linhas e 8 colunas;
- 6 teclas;
- 1 interface para comunicação serial RS232;
- Conversor analógico-digital de 10 bits;
- 1 entrada analógica 0 a 5Vdc;
- 4 entradas para sensor de temperatura NTC (Negative Temperature Coefficient);
- PWM (Pulse Width Modulation) de 10 bits;
- 1 saída a Transistor com capacidade de corrente de 3A/12Vcc controlada com PWM;
- 1 saída a Triac com capacidade de corrente de 10A/220Vca;
- Circuito de sincronismo com a rede elétrica.

Para utilização no Sistema de controle, foi desenvolvido um programa em Linguagem C para a implementação das funções de aquisição de dados e controle.

Para a aferição dos sensores de temperatura, foram utilizados potenciômetros eletrônicos.

A2.1 Esquema Elétrico da Placa

A seguir, encontra-se o esquema elétrico da Placa de aquisição e controle.

Figura 41 Esquema elétrico Placa aquisição e controle (CPU e interface)

Figura 42 Esquema elétrico Placa aquisição e controle (sensores e atuadores)

A2.2 Montagem da Placa

A foto da Placa de aquisição e controle se encontra na Figura 43 a seguir.

Figura 43 Foto da Placa de aquisição e controle

A seguir encontra-se a descrição da foto da Placa de aquisição e controle:

- 1: Resistência de aquecimento;
- 2: Rede elétrica;
- 3: Comunicação serial RS232;
- 4: Bomba de água;
- 5: Sensores de temperatura;
- 6: Gravação do microcontrolador;
- 7: Conector de alimentação.

A3 VALIDAÇÃO DO CONTROLADOR PID

A validação do Controlador PID foi realizada com o objetivo de verificar o seu funcionamento. Os teste realizados utilizam o Controlador PID como um filtro digital que mede o sinal aplicado à sua entrada, processa o algoritmo de controle e atualiza o valor da sua saída.

A implementação do Controlador PID utiliza a Placa de aquisição e controle. Na Figura 44, encontra-se o diagrama de blocos utilizado na validação.

Figura 44 Diagrama de blocos da implementação do Controlador PID

A seguir, encontra-se a descrição dos componentes do diagrama da Figura 44:

- $r(t)$: sinal analógico de entrada com variação de 0 a 5Vdc. Este sinal seria, em um Sistema real, a referência do Controlador. O sinal medido do processo não foi utilizado nesta validação por se tratar de um teste com o Controlador em malha aberta;
- FPB 1: filtro passa baixa de 1ª Ordem e frequência de corte 10Hz para eliminação do Aliasing;
- Conversor AD: conversor analógico-digital de 10 bits;
- $r(n)$: sinal amostrado;
- Scaling da Entrada: função que converte o range do sinal do conversor analógico-digital de 0 a 1023 para -1 a 1;

- Controlador PID programado com os seguintes parâmetros adotados para teste:
  - Período de amostragem (T): 50ms (20Hz);
  - Ganho do Controlador (K): 200;
  - Tempo da Integral (Ti): 0,4s;
  - Tempo da Derivada (Td): 0,8s;
  - Tempo de reset do anti Windup (Tt): Ti;
  - Ganho da derivada em alta frequência (N): 10;
  - Peso do setpoint no termo proporcional (b): 1;
  - Limite mínimo da saturação de saída (ulow): -512;
  - Limite máximo da saturação de saída (uhigh): 511.
- Scaling da saída: a função que converte o range da saída do Controlador PID de -512 a 511 em 0 a 1023;
- PWM: Pulse Width Modulation com 10 bits de resolução e frequência de 12kHz. Foi utilizado o PWM do microcontrolador;
- FPB 2: Filtro Passa Baixa de 1ª Ordem e frequência de corte 100Hz para extração do valor médio do PWM. A frequência do filtro é 120 vezes menor que a frequência do PWM;
- u(t): Sinal analógico de saída com variação de 0 a 5Vdc.

O conversor analógico-digital fornece medidas $r(n)$ cujos valores variam de 0 a 1023. Estas medidas são convertidas para -1 a 1 pelo Scaling da Entrada. O cálculo é realizado utilizando o microcontrolador a partir da seguinte equação:

$$R(n) = \frac{2 \cdot r(n)}{1023} - 1$$

A saída do Controlador PID varia de -512 a 511. Esta saída é convertida para a faixa de 0 a 1023 pelo Scaling da Saída que arredonda os números e os converte para números inteiros. O cálculo é realizado utilizando o microcontrolador a partir da seguinte equação:

$$u(n) = \text{round } U(n) + 512$$

A3.1 Diagrama de simulação para validação do Controlador

Na Figura 45, encontra-se o diagrama de blocos do Controlador PID para simulação no programa Matlab. Este diagrama foi obtido fazendo o termo c da equação 5-5 do Controlador PID igual 1:

Figura 45 Diagrama do Simulador para validação do Controlador PID

A3.2 Validação

A validação do Controlador PID é feita injetando-se o sinal de um gerador de funções na entrada do Controlador e monitorando-se o sinal de saída. O Controlador funciona como um filtro digital. São utilizados dois tipos de onda: quadrada e triangular como sinais de teste.

A coleta de dados utiliza um computador que é ligado por meio de comunicação serial RS232 à Placa de aquisição e controle. São enviados para o Computador os valores do sinal de entrada $r(n)$ e a respectiva saída $u(n)$.

A3.3 Controlador Proporcional (P)

A resposta do Controlador Proporcional a uma onda quadrada com frequência 1,0638Hz e período 0,94s está representada na Figura 46.

Figura 46 Resposta do Controlador P à onda quadrada

Com os valores de $r(n)$, os valores teóricos $u(n)$ são calculados e comparados com os recebidos. Na tabela a seguir, estão os resultados dos cálculos.

Tabela 11 Resultados da validação do Controlador P à onda quadrada

n	r(n)	R(n)	P(n)	u(n) Calculado	u(n) Medido
9	814	0,59139	118,27	630,28	630
10	218	-0,57380	-114,76	397,24	397

A resposta do Controlador a uma onda triangular com frequência 1,0870Hz e período 0,92s está representada na Figura 47.

Figura 47 Resposta do Controlador P à onda triangular

Com os valores de $r(n)$, os valores teóricos de $u(n)$ são calculados e comparados com os recebidos. Na tabela a seguir, estão os resultados dos cálculos.

Tabela 12 Resultados da validação do Controlador P à onda triangular

n	r(n)	R(n)	P(n)	u(n) Calculado	u(n) Medido
19	783	0,53079	106,16	618,16	618
28	222	-0,56598	-113,19	398,80	399

Os resultados experimentais estão próximos dos resultados teóricos obtidos com o simulador comprovando que a implementação está correta.

A3.4 Controlador Proporcional + Integral (PI)

A resposta do Controlador a uma onda quadrada com frequência 1,0526Hz e período 0,95s está representada na Figura 48.

Figura 48 Resposta do Controlador PI à onda quadrada

Na transição de níveis de tensão da onda quadrada, além do termo proporcional, a saída do Controlador é influenciada pelo termo integral. A expressão a seguir permite calcular o valor teórico:

$$u(n) - u(n-1) = K \cdot \left[R(n) - R(n-1) + \frac{T}{T_i} \cdot R(n-1) \right]$$

Na tabela a seguir, estão os resultados dos cálculos:

Tabela 13 Resultados da validação do Controlador PI

n	r(n)	R(n)	u(n)	$u(18) - u(17)$ Medido	$u(18) - u(17)$ Calculado	$\frac{K}{T_i} \cdot R(27)$ Calculado	$\frac{u(36) - u(27)}{9 \cdot T}$ Medido
17	809	0,58162	631	-216	-215,76	293,74	291,11
18	220	-0,56989	415				
27	812	0,58749	518				
36	812	0,58749	649				

A inclinação teórica da rampa (293,74) calculada com o valor $r(27)$, considera que a amplitude da onda quadrada se mantém constante durante a integração. Isto não ocorre e justifica a diferença em relação ao valor medido (291,11).

A3.5 Teste do anti Windup

A resposta do Controlador a uma onda quadrada com frequência 0,1220Hz e período 8,2s está representada na Figura 49.

Figura 49 Teste anti Windup do Controlador PI

Na tabela a seguir, estão os resultados dos cálculos.

Tabela 14 Resultados da validação do anti Windup do Controlador PI

n	r(n)	R(n)	u(n)	$\frac{K \cdot R(150)}{T_i}$ Calculado	$\frac{u(161) - u(100)}{61 \cdot T}$ Medido
100	219	-0,5719	116	292,7	297,4
150	811	0,5855	815		
161	811	0,5855	1023		

A partir dos resultados apresentados na tabela anterior, conclui-se que o anti Windup do Controlador funciona corretamente.

A3.6 Controlador Proporcional + Derivativo (PD)

A resposta do Controlador PD a uma onda quadrada com frequência 0,1087Hz e período 9,2s está representada na Figura 50.

Figura 50 Resposta do Controlador PD à onda quadrada

Na tabela a seguir, encontram-se os valores teóricos e práticos comprovando a validade do Controlador implementado.

Tabela 15 Resultados da validação do Controlador PD à onda quadrada

n	r(n)	R(n)	u(n)	$u(24) - u(23)$ Calculado	$u(24) - u(23)$ Medido
23	444	-0,13196	484	313,34	313
24	556	0,08699	794		

A resposta do Controlador PD a uma onda triangular com frequência 0,1087Hz e período 9,2s está representada na Figura 51.

Figura 51 Resposta do Controlador PD à onda triangular

Na tabela a seguir, encontram-se os valores teóricos e práticos comprovando a validade do Controlador implementado.

Tabela 16 Resultados da validação do Controlador PD à onda triangular

n	r(n)	R(n)	u(n)	$u(150) - u(100)$ Calculado	$u(150) - u(100)$ Medido
100	531	0,038123	479	118,48	118
150	228	-0,55425	361		

O termo derivativo do Controlador funciona corretamente, como é possível observar a partir dos resultados da tabela anterior.

A4 CÓDIGO FONTE CONTROLADOR PID

A seguir, encontra-se o código fonte parcial, em Linguagem C, do Controlador PID implementado no microcontrolador. As funções de interface com o usuário e comunicação não foram incluídas. O programa completo se encontra gravado no CD que acompanha esta Dissertação.

```
//=====
// Programa implementação de um Controlador PID
// Aluno: Denis Fava Cerchiaro
// Orientador: Fuad Kassab Júnior
// Arquivo: Controlador.c
//=====

/** * * * Microcontrolador * * * * *
#include<18f452.h>      // microcontrolador utilizado
#include <regs_18fxx2.h>

/** * * * * Configurações para gravação * * * * *
#fuses HS,NOPROTECT,NOLVP,PUT

/** * * Definições p/ compilação * * * * *
#device *=16                //Definição para utilizar ponteiros de 16 bits
                             //e conseguir utilizar banco 2 e 3 da RAM
                             //Com esta diretiva o compilador utiliza bit IRP do STATUS
                             //para fazer endereçamento indireto utilizando o FSR
#device ADC=10              //Definição do número de bits do AD

/** * * * * Definições rotinas de Delay * * * * *
#use delay(clock=20000000,RESTART_WDT)    //Define que wdt sera limpo nas rotinas de delay

/** * * * * Definições rotinas de Usart * * * * *
#use rs232(baud=9600,xmit=pin_c6,rcv=pin_c7,parity=n,bits=8,errors)

/** * * *          Constantes internas          * * * * *
```



```

#define usDUTY_MAX_ATUADOR 40000 //Número de ciclos em 8ms de timer 3
#define usPULSE_ATUADOR_MIN 500 //Número de ciclos em 100us de timer 3
#define usPULSE_ATUADOR_MAX 1500 //Número de ciclos em 300us de timer 3

/* * * * * Definição e inicialização das variáveis globais * * * * *
int16 duty_bomba=0; //Controle do bomba de água
int16 usDutyAtuador=0; //Controle do disparo do atuador de aquecimento
int16 usPulseAtuador=0; //Controle do pulso do atuador de aquecimento

//***** conversão AD *****
int cont_amostragem=0; //contador para gerar 25ms do pwm de baixa frequencia
int16 canal0,canal1,canal2,canal3, y_lido; //valores analógicos dos canais

//***** Variáveis do Controlador PID *****
float m_fSetpoint; //Setpoint
float m_fErro; //Erro
float m_fY; //Variável medida
float u; //Saída do controlador
float v; //Saída limitada do controlador
float m_fY_old; //Variável medida com atraso
float x; //Variável de estado Proporcional
float I; //Variável de estado Integral
float D; //Variável de estado Derivativa

//***** Parâmetros do Controlador PID *****
float K; //Cte Proporcional
float Ti; //Tempo Integral (s)
float Td; //Tempo Derivada (s)
float Tt; //Tempo de reset do anti Windup (s)
float Nd; //Máximo Ganho da derivada em alta frequência
float b; //Fração do Setpoint para o termo derivativo
float ulow; //Limite inferior de saturação do atuador
float uhigh; //Limite superior de saturação do atuador
float T; //Período de Amostragem (s)
float bi,ar,bd,ad; //Constantes do algoritmo PID
float Iold; //Variavel de atraso para PID com integral de Tustin e derivada backward
difference
float Ki; //Variavel da integral
float Kd; //Variavel de derivada

```

```

//***** Variáveis de medida e atuação do Controlador PID *****
int16 atuador=0;          //Variável de atuação do atuador
int tipo_controle=0;
#define Pot_atuador (float) 425    //[W]
#define Scaling_atuador (float) (100/Pot_atuador)    //[W]

/* Outras variáveis, a tabela do atuador e dos sensores de temperatura
   foram omitidas por serem extensas e se encontram no CD que
   acompanha a Dissertação
*/

// * * * * * Tratamento da interrupção de mudança de estado no port B *****
#define int_rb fast          //O flag da int. será limpo manualmente
void trata_change()
{
char portb_aux;
if(rbif==1)
{
portb_aux=portb;          //Lê o port B. É uma recomendação do manual
rbif=0;                  //Limpa flag da int.
pwm=0;
if (usDutyAtuador > 0 )
{
set_timer3(65536-1-usDutyAtuador);    //Define o angulo de disparo
TMR3ON=1;                            //Habilita a contagem do timer 3
}
}
else
{
if (TMR3IF==1)
{
TMR3IF=0;                        //limpa flag da interrupção
if ( pwm==1 )
{
pwm=0;
TMR3ON=0;                        //Desliga contagem do timer 3
}
}
else
{
pwm=1;
}
}
}

```

```

        set_timer3(65536-1-usPulseAtuador); //Define a largura do pulso do disparo
    }
}
}

/** * * * * Rotina de tratamento da interrupção de timer 1 * * * * * */
#int_timer1 noclear           //O flag da int. será limpo manualmente
void trata_timer1()
{
    tmr1if=0;                 //Limpa flag da int.
    set_timer1(65536-5000+42); //Ajusta para contar ate 5000
    if (++cont_amostragem==250) //Seleciona 4Hz de amostragem (250ms)
    {
        cont_amostragem=0;
        set_adc_channel(0);    //Seleciona canal 0
        delay_us(50);
        canal3=read_adc();     //Lê AD
        canal3=NTC[canal3];
        y_lido=canal3;         //Salva valor lido da saída do processo que será usado pelo PID
        if (f_controle == TRUE)
            PID();              //Calcula controle e atua no processo
        else
            u = 0;
        f_tx=1;                //informa que deve atualizar o display e transmitir RS232
    }
}

/** * * * * Inicialização do Controlador PID * * * * */
void PID_Init()
{
    x=0;
    I=0;
    D=0;
    m_fErro=0;
    m_fY=0;
    m_fY_old=0;
    Iold=0;
    m_fSetpoint = 37.0;        //Setpoint
    K=500.0;

```

```

Ti=250.0
Td=0.0;
Tt=0.9*Ti;
Nd=10;
b=1;
ulow=0;
uhigh=Pot_atuador;
T=0.25;
bd=K*Nd*Td/(Td+Nd*T);
ad=Td/(Td+Nd*T);
Kd=K*Td/T;
if (Ti == 0)
{
    bi=0;
    ar=0;
    Ki=0;
}
else
{
    bi=(K*T)/Ti;
    ar=T/Tt;
    Ki=K/Ti;
}
}

/** * * * * * Calcula saída de controle * * * * * */
void PID_calcula_saida()
{
    //Termpo Proporcional
    x=K*b*m_fErro;           //Calcula proporcional com o erro do processo
    //Termpo Derivativo
    D=ad*D+bd*(m_fY - m_fY_old); //Calcula derivada com a saída do processo
    v=x+I+D;                 //Calcula sinal de controle
    if(v<ulow)                //Saturação do atuador
        u=ulow;
    else if (v>uhigh)
        u=uhigh;
    else
        u=v;
}

```

```

/** * * * * * Atualiza estados do PID * * * * *
void PID_estados()
{
    I=I+bi*(m_fErro)+ar*(u-v); //Termo Integral com anti Windup
    m_fY_old = m_fY;           //Atraso do valor medido
}

/** * * * * Controle PID * * * * * */
void PID()
{
    int8 ucDuty;
    m_fY = (float) y_lido;           //Lê saída do processo (y)
    m_fY = m_fY/10; //Divide por 10 pois a leitura do sensor fornece a temperatura multiplicada por 10
    m_fErro= m_fSetpoint - m_fY;     //Calcula Erro
    PID_calcula_saida();             //Calcula valor do esforço de controle
    ucDuty = (int8) (u*(Scaling_atuador)); //Converte o valor de u para inteiro
    usDutyAtuador = (int16) Atuador_Lin[ucDuty];
    if (ucDuty>90)
        usPulseAtuador= (int16)(usPULSE_ATUADOR_MAX);
    else
        usPulseAtuador= (int16)(usPULSE_ATUADOR_MIN);
    PID_estados();                   //Atualiza estados do controlador
}

/** * * * * Loop * * * * *
void main ()
{
    while(TRUE)
    {
        RESTART_WDT();               //Limpa wdt
        /* Outras tarefas de menor prioridade como a varredura de teclado, atualização
        do display e comunicação serial são executadas no programa principal mas
        foram omitidas. O completo se encontra no CD que acompanha a dissertação
        */
    }
}

```

A5 PROGRAMAS PARA MATLAB

A seguir, encontram-se os códigos desenvolvidos para o programa Matlab.

A5.1 Arquivo para Tanque

```
% *****
% Descrição: Parametros do Tanque de aquecimento
% Arquivo: mTanque1.m
% *****

%Parametros do Tanque
Vazao=2720      %Vazao no Tanque [ml/min]
P_tanque=425    %Potencia da resistencia eletrica [W]
Perdas=2.78     %Potencia da resistencia eletrica [W]
V_tanque=0.65e-3 %Volume de agua no Tanque [m3]
ro_tanque=1000  %Densidade do fluido no Tanque [kg/m3]
cp_tanque=1000  %Calor especifico do fluido no Tanque[cal/kg.C]
```

A5.2 Arquivo para Trocador de Calor

```
% *****
% Descrição: Parametros do Trocador de Calor
% Arquivo: mTrocador.m
% *****

%Condições iniciais
T_amb=19;      %Temperatura ambiente

%Parametros do trocador
%Trocador 1 - cobre
%Cobre
%di=0.001;     %Diametro do capilar
```

```

%do=0.002;           %Diametro do capilar
%D=0.013;            %Diametro do Casco
%L=0.17;             %Comprimento do trocador de calor
%A=pi*di*L;          %Area de troca de calor [m2]

%Trocador 2 - cobre
di=0.0019;           %Diametro do capilar
do=0.00318;          %Diametro do capilar
D=0.013;             %Diametro do Casco
L=0.30;              %Comprimento do trocador de calor
A=pi*di*L;           %Area de troca de calor [m2]

%Parametros tubo
Vt=pi*di^2*L/4;      %Volume do tubo [m3]
rot=1000;            %Densidade do fluido do tubo [kg/m3]
cpt=1000;            %Calor especifico do fluido do tubo[cal/kg*C]

%Parametros casco
Vc=pi*(D^2-do^2)*L/4; %Volume do casco [m3]
roc=1000;            %Densidade do fluido do casco [kg/m3]
cpc=1000;            %Calor especifico do fluido do casco[cal/kg.C]

hi=3000*0.96         %coeficiente de convecao convectivo do Tubo [W/m².K]
ho=10000*0.96        %coeficiente de convecao convectivo do Casco [W/m².K]
k=399.0              %condutividade [termica do cobre [W/m.K]
Ai=pi*di*L;          %Area de troca de calor [m2]
Ao=pi*do*L;          %Area de troca de calor [m2]

U=((1/hi+Ai*log(do/di)/(2*pi*k*L)+Ai/(Ao*ho))^-1)/4.1868 %coeficiente Global
de Troca de Calor [cal/s.m².C]

```

A5.3 Arquivo para Simulador do Controlador PID

A seguir, encontra-se o arquivo desenvolvido para calcular os parâmetros do Controlador PID. O programa se encontra no formato adequado para ser executado no programa Matlab.

```
% * * * * *
% Descrição: Parametros do Controlador PID com
%          anti Windup, derivada na saída,
%          limitação ganho da derivada na saída
%          em alta frequência e ponderação do setpoint
% Arquivo: mPid.m
% * * * * *

T=0.25      %Amostragem (segundos)

Kc=100      %Ganho
Ti=15       %Tempo integral
Td=1        %Tempo derivativo
Tt=1*Ti     %Tempo do anti Windup
N=10        %Maximo ganho da derivada
ulow=0      %Saturação do Atuador
uhigh=425   %Saturação do Atuador

b=1;
ad=Td/(Td+N*T);
bd=Kc*N*Td/(Td+N*T);

if (Ti == 0)      %Controlador P ou PD
    bi=0;
    bt=0;
else
```



```

    bi=Kc*T/Ti;    %Controlador PI ou PID
    bt=T/Tt;
end

```

A5.4 Programa para coleta de dados

O programa para aquisição de dados foi desenvolvido no programa Matlab e utiliza a porta serial RS232 do computador para receber os dados. O programa faz a aquisição de 4 canais de dados o que permite monitorar o valor de 4 variáveis simultaneamente.

A seguir, encontra-se o código fonte do programa.

```

% *****

% Descrição: Programa para coleta de dados
% Arquivo: ColetorOpen1.m
% *****

% Abre a porta de comunicação %
fclose(s);
clear all;
close all;
clc;
s = serial('COM2','BaudRate',9600);    %Define configurações da porta serial
fopen(s);                               %Abre porta de comunicação

%Loop de Recepção de dados%
i=1;
while (1)
    for j = 1:13,
        buffer(j)=fread(s,1);
        switch j
            case 1
                if buffer(1) ~= 'T'
                    break
                end

```

```

case 2
    if buffer(2) ~= '0'
        break
    end
case 5
    if buffer(5) ~= '1'
        break
    end
case 8
    if buffer(8) ~= '2'
        break
    end
case 11
    if buffer(11) ~= '3'
        break
    end
case 13
    t0(i)=buffer(3)*256+buffer(4);
    t1(i)=buffer(6)*256+buffer(7);
    t2(i)=buffer(9)*256+buffer(10);
    t3(i)=buffer(12)*256+buffer(13);
    disp('T0: ')
    t0(i)
    disp('T1: ')
    t1(i)
    disp('T2: ')
    t2(i)
    disp('T3: ')
    t3(i)
    i=i+1;
end
end

```

A6 ARTIGO PUBLICADO

Foi publicado um artigo na Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL) realizada no período de 22 a 24 de Novembro de 2005 no Campus de Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia no Estado de Minas Gerais.

O Título do Artigo publicado é: Controle de Temperatura de um Trocador de Calor.

O site do evento realizado pode ser acessado na Internet através do endereço eletrônico:
www.ceel.eletrica.ufu.br.

O Artigo publicado se encontra gravado no CD que acompanha esta Dissertação.

LISTA DE REFERÊNCIAS

AGUIRRE, LUIS ANTONIO. **Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais**. 1ª Edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000.

AHMED, ASHFAQ. **Eletrônica de Potência**. 1ª Edição. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

ÅSTRÖM, KARL J.; HÄGGLUND, TORE. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. Second Edition. North Carolina: ISA – The International Society of Measurement and Control, 1994.

ÅSTRÖM, KARL J.; WITTENMARK, BJÖRN. **Computer-Controlled Systems: Theory and Design**. Third Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1997. (Prentice Hall Information and System Sciences Series. Thomas Kailath, Series Editor).

BERNSTEIN, DENNIS. **Self-Assessment and Shelf- Assessment**. IEEE Control Systems Magazine. New York, NY, Vol. 26, No. 1, p. 26-29, February 2006.

BOHN, MARK S.; KREITH, FRANK. **Principles of Heat Transfer**. Fifth Edition. Boston: PWS Publishing Company, 1997.

COGGAN, D. A. **Fundamentals of Industrial Control**. Second Edition. Hitchin: ISA – The International Society of Measurement and Control, 1992. (Practical Guides for Measurement and Control).

GARCIA, CLÁUDIO. **Modelagem e Simulação**. 1ª Edição. São Paulo: Editora EDUSP, 1997.

MICROCHIP. **PIC 18Fxx2 Data Sheet**. Microchip Technolog Inc, 2002. Disponível em www.microchip.com

OGATA, KATSUHIKO. **Engenharia de Controle Moderno**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Prentice-Hall do Brasil Ltda, 1997.

PEREIRA, FÁBIO. **Microcontroladores PIC – Programação em C**. 3ª Edição. São Paulo: Editora Érica, 2004.

VIEIRA, F. L. M.; FILHO, A. PETTRI. **An Automatic Temperature Control System for Solutions in Free Flow**. *Pflugers Archiv*, Alemanha, v. 437, p. 285-288, 1999.

OGATA, KATSUHIKO. **Discrete Time Control Systems**. Second Edition. New Delhi: Prentice Hall of India, 2005.