

VALDIR MELERO JUNIOR

**INSTRUMENTAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE UM PROCESSO DE
SANITIZAÇÃO CINÉTICA CIP**

São Caetano do Sul

2011

VALDIR MELERO JUNIOR

**INSTRUMENTAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE UM PROCESSO DE
SANITIZAÇÃO CINÉTICA CIP**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de
Tecnologia para obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Linha de Pesquisa: Análise e Otimização de
Processos da Indústria Química.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Ribeiro Augusto

São Caetano do Sul

2011

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por toda saúde e disposição que tem me concedido, as quais são essenciais em qualquer tipo de trabalho.

À minha família: meu pai, exemplo de dignidade, sabedoria, ensinamento e dedicação; minha mãe, sinônimo do maior amor que conheço; minhas queridas irmãs, por incontáveis vezes minhas mães; e à minha futura esposa Rosana, o pilar de sustentação, mostrando sempre compreensão, dedicação, paciência e companheirismo em nossas conquistas.

Ao orientador e amigo Prof. Dr. Sergio Ribeiro Augusto, por acreditar em meu trabalho e pacientemente fornecer com excelência parte de seus preciosos conhecimentos, sempre com total empenho e dedicação.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Ademar Ferreira e Prof. Dr. Rubens Gedraite, pelo aceite do convite e honrosa disposição para avaliar meu trabalho.

Ao querido Prof. Mario Pagliaricci, precursor da minha carreira profissional e amigo por mais de duas décadas.

Aos parceiros e amigos Rodrigo Sislian, Douglas Dalla Justina e a tantos outros que, de forma direta ou indireta, contribuíram com essa etapa da minha vida.

Ao Instituto Mauá de Tecnologia pela oportunidade concedida ao meu curso de mestrado.

“Somente um principiante que não sabe nada sobre ciência diria que ela descarta a fé. Se você realmente estudar a ciência, esta certamente o levará para mais perto de Deus”.

James Clerk Maxwell

RESUMO

No meio industrial é comum que a remoção de resíduos de equipamentos seja feita por processos empíricos, os quais se dão devido à falta de informações precisas ou de conhecimentos técnicos necessários sobre os processos a serem controlados, ocasionando desperdícios para a indústria. Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivos instrumentar um trocador de calor tipo feixe tubular com dimensões industriais típicas visando aplicações de processos de limpeza CIP (*clean in place*) e identificar, de forma experimental, um modelo simplificado que represente o comportamento dinâmico do pH na etapa de enxágue de tal processo. As influências da vazão e da temperatura empregadas na etapa de enxágue são avaliadas e uma estimativa do tempo necessário para sua execução é obtida do modelo simplificado. Aspectos de filtragem dos dados experimentais usando *wavelets* são também apresentados. Pretende-se que os resultados aqui obtidos possam contribuir com a economia de água e energia de um processo CIP, visando otimização do tempo total necessário para a realização da etapa de enxágue desse tipo de sistema.

Palavras-chave: Sistema de limpeza CIP. Trocador de calor feixe tubular. Cinética de remoção. Identificação de sistemas. Controle de vazão. Controle de temperatura. *Wavelet*.

ABSTRACT

In the industrial environment is common that the removal of equipment residues be made by empirical processes, due to lack of technical information or knowledge about the processes to be controlled, causing additional costs for the industry. In this context, this work has as objectives to instrument an industrial shell and tube heat exchanger aiming applications of CIP cleaning processes (clean in place) and to identify, in an experimental way, a simplified model that represents the dynamic behavior of the pH in the rinse phase of such process. The influences of the flow and temperature in the rinse stage are evaluated and a estimate of the necessary time for its execution is obtained of the simplified model. Aspects of filtering, concerning the experimental data, using wavelets are also presented. It is intended that the results obtained here can contribute to saving water and energy of a CIP process, aimed at optimizing the total required time to perform the rinsing stage of such a system.

Key-words: CIP cleaning system. Shell and tube heat exchanger. Kinetic of removal. System identification. Flow control. Temperature control. Wavelet.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1 - | Fluxograma geral das etapas de um processo CIP..... | 35 |
| Figura 2 - | Pré-lavagem do sistema com água recuperada..... | 36 |
| Figura 3 - | Limpeza do sistema com solução de soda cáustica como detergente. | 37 |
| Figura 4 - | Etapa de enxágue com água tratada. | 40 |
| Figura 5 - | Sanitização do sistema com água quente. | 42 |
| Figura 6 - | Resfriamento do sistema com água tratada proveniente da rede. | 43 |
| Figura 7 - | Controladores Lógicos Programáveis, fonte ROCKWELL (2010). | 44 |
| Figura 8 - | Curva de resposta de processo sobreamortecido com atraso de transporte de ordem 2 ou superior submetido a degrau de amplitude A | 49 |
| Figura 9 - | Aplicação do método da tangente para determinação dos parâmetros θ e τ do modelo representado por um sistema de 1 ^a ordem mais atraso de transporte. | 50 |
| Figura 10 - | Obtenção dos parâmetros θ e τ pelo método dos 63,2 % a partir de uma curva de resposta do processo..... | 51 |
| Figura 11 - | Exemplo de sistema sobreamortecido normalizado em resposta ao degrau. | 54 |
| Figura 12 - | Exemplo de decomposição de sinais por transformada de Fourier (WAVELET, 2011)..... | 57 |
| Figura 13 - | Exemplo de comparação entre uma senóide e uma <i>wavelet</i> | 59 |
| Figura 14 - | Decomposição de um sinal em suas componentes <i>wavelets</i> constituintes por CWT (DIAS, 2003). | 60 |
| Figura 15 - | Processo de filtragem de um sinal S , com resultado nas parcelas A e B (MALANGE, 2010). | 62 |
| Figura 16 - | Processo para decomposição por filtragem sem e com <i>downsampling</i> (MALANGE, 2010). | 62 |
| Figura 17 - | DWT para um sinal senoidal com ruído (DIAS, 2003)..... | 63 |
| Figura 18 - | Função <i>wavelet</i> de <i>Haar</i> | 64 |
| Figura 19 - | Função <i>wavelet</i> de <i>Daubechies</i> | 64 |
| Figura 20 - | Função <i>wavelet</i> de <i>Morlet</i> | 65 |
| Figura 21 - | Função <i>wavelet</i> <i>chapéu mexicano</i> | 65 |
| Figura 22 - | Função <i>wavelet</i> de <i>Meyer</i> | 66 |
| Figura 23 - | Planta com trocador de calor tipo feixe tubular instrumentado. | 69 |
| Figura 24 - | Tubos internos do trocador de calor para o fluído de processo..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 - Sequência das 4 seções de passagem do fluído de processo nos tubos do trocador de calor | 70 |
| Figura 26 - Válvulas para manobra da saída do fluído de processo ao reservatório de entrada ou descarte..... | 70 |
| Figura 27 - Rotor helicoidal de bomba centrífuga. | 71 |
| Figura 28 - Bomba de deslocamento para fluído de processo. | 72 |
| Figura 29 - Bomba centrífuga para circulação de água quente..... | 73 |
| Figura 30 - Válvula eletropneumática de controle do vapor de aquecimento. | 73 |
| Figura 31 - Legenda das temperaturas medidas no trocador de calor: T3 e T1 fluído de processo, T4 e T2 água de aquecimento. | 74 |
| Figura 32 - Diagrama geral do processo e da instrumentação. | 76 |
| Figura 33 - Placa de aquisição de dados da NATIONAL INSTRUMENTS® | 78 |
| Figura 34 - Placa de conexões da NATIONAL INSTRUMENTS® | 78 |
| Figura 35 - Posicionamento dos elementos de medição de temperatura da entrada (T3) e saída (T1) do fluído de processo. | 79 |
| Figura 36 - Posicionamento dos elementos de medição das temperaturas da entrada (T4) e saída (T2) da água quente de aquecimento. | 80 |
| Figura 38 - Esquema com princípio de funcionamento das engrenagens ovais do medidor de vazão (METROVAL, 2007)..... | 81 |
| Figura 39 - Instalação do medidor de vazão METROVAL modelo OI-2 SMRX/FS..... | 82 |
| Figura 40 - Acoplador do sinal de vazão METROVAL modelo METROFLUX AG19..... | 82 |
| Figura 41 - Medidor de pH MICRONAL, modelo B-474 - phmetro | 83 |
| Figura 42 - Tela do programa para leitura do sinal serial de pH. | 83 |
| Figura 43 - Inversor de frequência..... | 84 |
| Figura 44 - Conversor I/P ENGINSTREL, modelo 621IPB | 85 |
| Figura 45 - Condicionadores de sinais para medidas de temperaturas e atuação no conversor I/P da válvula eletropneumática de vapor. | 85 |
| Figura 46 - Fluxograma básico com as etapas do processo CIP para estudo da etapa de enxágue..... | 89 |
| Figura 47 - Diagrama em blocos do processo para etapa da obtenção de modelos paramétricos. | 90 |
| Figura 48 - Simulação de um sinal senoidal com ruído..... | 95 |
| Figura 49 - Comparação do sinal senoidal sem ruído original e resultado após filtragem.... | 96 |

| | |
|--|-----|
| Figura 50 - Exemplo de filtragem utilizando a ferramenta <i>Wavelet</i> do MATLAB [®] para ensaio com degrau na vazão..... | 97 |
| Figura 51 - Ensaio de medida da vazão com degraus simétricos no <i>set-point</i> de 7 l/min para 10 l/min. | 98 |
| Figura 52 - Ensaio de medida de temperatura da saída do fluído de processo. | 99 |
| Figura 53 - Exemplo de programa MATLAB [®] para simulação do comportamento dos controladores testados. | 101 |
| Figura 54 - Respostas dos controladores tipo PI na vazão do fluído de processo simulados em MATLAB [®] | 102 |
| Figura 55 - Respostas dos controladores tipo PID na temperatura da saída do fluído de processo simulados em MATLAB [®] | 102 |
| Figura 56 - Resposta do controlador sintonizado da vazão do fluído de processo implementado na plataforma LabVIEW [®] | 103 |
| Figura 57 - Resposta do controlador sintonizado da temperatura da saída do fluído de processo implementado na plataforma LabVIEW [®] | 105 |
| Figura 58 - Curva do comportamento do phmetro utilizado em função da variação de temperatura da solução a ser medida..... | 106 |
| Figura 59 - Comparação de enxágue com e sem pré-incrustação com leite; degrau na vazão de 0 para 9 l/min e temperatura fixa 50°C..... | 107 |
| Figura 60 - Comparação de enxágue com e sem pré-incrustação com leite; degrau na vazão de 0 para 9 l/min e temperatura fixa 50°C; após filtragem..... | 108 |
| Figura 61 - Comparação do comportamento do pH com variação de temperatura, na vazão de 9 l/min..... | 109 |
| Figura 62 - Comparação do comportamento do pH com variação de vazão, na temperatura fixa de 50°C | 110 |
| Figura 63 - Tempo total de enxágue em função da vazão utilizada..... | 111 |
| Figura 64 - Simulações dos sistemas aproximados do comportamento (pH x segundo) para ensaios de 4 l/min a 12 l/min..... | 113 |
| Figura 65 - Simulações dos sistemas aproximados do comportamento (pH x segundo) para ensaios de 14 l/min e 16 l/min..... | 114 |
| Figura 66 - Tempo medido para realização da etapa de enxágue comparado como previsto através dos dados dos modelos obtidos ($t_{final} = \theta + 3,5\tau$)..... | 115 |

| | |
|--|-----|
| Figura 67 - Comportamento das constantes de tempos dos modelos de 1 ^a ordem em função da vazão..... | 116 |
| Figura D.1 - Painel Frontal do programa para coleta de dados em LabVIEW®..... | 128 |
| Figura D.2 - Diagrama em blocos do programa para coleta de dados em LabVIEW® | 129 |
| Figura E.1 - Painel frontal dos controladores: aquisição da vazão, temperaturas e pH usando LabVIEW® | 130 |
| Figura E.2 - Diagrama em blocos dos controladores: aquisição da vazão, temperaturas e pH usando LabVIEW®..... | 131 |
| Figura F.1 - Simulação do pH em modelos de 1 ^a e 2 ^a ordem utilizando o SIMULINK / MATLAB® | 134 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabela 1 - | Classificação de resíduos orgânicos e inorgânicos (MARRIOT, 1994). | 32 |
| Tabela 2 - | Quadro com os elementos básicos de modelos aproximados de processos industriais. | 48 |
| Tabela 3 - | Parâmetros dos modelos de 1 ^a ordem e 2 ^a ordem sobreamortecido, ambos com atraso de transporte θ | 112 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| AE | Medidor, condicionador e transmissor de medida de pH |
| CEUN | Centro Universitário |
| CIP | Limpeza no local (<i>Clean in place</i>) |
| CLP | Controlador lógico programável |
| CWT | Transformada <i>wavelet</i> contínua (<i>Continuous Wavelet Transform</i>) |
| DWT | Transformada <i>wavelet</i> discreta (<i>Discrete Wavelet Transform</i>) |
| ET | Condicionar de sinal elétrico V/I |
| FT | Medidor, condicionador e transmissor de vazão |
| I/P | Conversor corrente elétrica para pressão pneumática |
| IMT | Instituto Mauá de Tecnologia |
| ITAE | Integral do módulo do erro |
| P | Proporcional |
| pH | Medição do potencial hidrogeniônico |
| phmetro | instrumento utilizado para efetuar a medida do pH |
| PI | Proporcional integral |
| PID | Proporcional integral diferencial |
| SBCTA | Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnológica de Alimentos |
| SC | Controle de velocidade de fluído |
| SECD | Sistema eletrônico de coleta de dados |
| SWT | Transformada <i>wavelet</i> estacionária (<i>Stationary wavelet transform</i>) |
| TT | Sensor, condicionador e transmissor de temperatura |
| WT | Transformada <i>wavelet</i> (<i>wavelet transform</i>) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------------|---|
| A | amplitude do degrau da excitação de entrada |
| cD | detalhes |
| cA | aproximações |
| D_r | diâmetro de rotor |
| $D(q)$ | polinômio com operador de atraso |
| Er | excentricidade do eixo |
| $f(x)$ | função periódica em x |
| $F(\omega)$ | transformada de <i>Fourier</i> |
| $G(s)$ | função de transferência |
| i, k | índice |
| $I_{\{ w > \lambda\}}$ | função indicadora em função da energia w e do nível de limiar λ |
| K | ganho proporcional |
| K_p | ganho proporcional de controlador |
| m_I | área externa à curva |
| M_i | inclinação da tangente no ponto de inflexão de $y(t)$ |
| Pr | passo do rotor |
| Q | vazão da bomba |
| QM | vazão manipulada |
| sgm | função sigmóide |
| t | instante de tempo |
| T | período de um sinal cíclico |
| T_1, T_2, T_3, T_4 | temperaturas medidas |
| Td | constante de tempo diferencial de controlador |

| | |
|-----------------------|---|
| ti | ponto de inflexão de $y(t)$ |
| Ti | constante de tempo integral de controlador |
| tm | instante em que ocorre a intersecção de reta tangente com valor em regime |
| TM | temperatura manipulada |
| $u(t-\theta)$ | degrau deslocado para o instante t |
| w | energia do sinal filtrado por <i>wavelet</i> |
| α | variável auxiliar utilizada no cálculo de τ_1 e τ_2 |
| $\delta_\lambda^s(w)$ | sinal resultante após filtragem por <i>wavelet</i> |
| χ | variável auxiliar para manipulação da expressão de λ |
| ΔpH | intervalo de variação da saída pH |
| ΔQ | variação da excitação de entrada de vazão |
| Δx | intervalo de variação da excitação de entrada x |
| Δy | intervalo de variação da saída y |
| ζ | coeficiente de amortecimento |
| η | variável auxiliar para cálculo da relação entre τ_1 e τ_2 |
| θ | tempo morto, atraso puro de tempo ou atraso de transporte; deslocamento de tempo |
| λ | parâmetro intermediário que relaciona tm , mI e Mi ; nível de limiar (<i>threshold</i>) |
| τ | constante de tempo para sistema de 1 ^a ordem |
| τ_1, τ_2 | constante de tempo para sistema de 2 ^a ordem |
| $\psi(a,b,c)$ | função <i>wavelet</i> |
| ω_n | frequência natural não amortecida |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 OBJETIVOS | 21 |
| 1.2 CONTRIBUIÇÕES | 21 |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 22 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 23 |
| 2.1 Considerações preliminares sobre higienização e sanitização de equipamentos..... | 23 |
| 2.2 Os sistemas de higienização empregados | 27 |
| 2.3 Fatores relevantes que participam do processo de deposição de resíduos em um trocador de calor..... | 30 |
| 2.3.1 Solução detergente alcalina..... | 32 |
| 2.3.2 Solução detergente ácida..... | 34 |
| 2.4 Etapas do processo de higienização CIP..... | 34 |
| 2.4.1 Pré-lavagem..... | 35 |
| 2.4.2 Aplicação de soluções detergentes - pré-sanitização | 37 |
| 2.4.3 Enxágue | 39 |
| 2.4.4 Sanitização..... | 40 |
| 2.4.5 Lavagem final..... | 42 |
| 2.5 Sistema de controle tipicamente empregado em processo CIP | 43 |
| 2.6 Identificação de sistemas..... | 45 |
| 2.6.1 Formas para identificação de sistemas | 46 |
| 2.6.1.1 Aproximação para sistemas de ordem 1..... | 48 |
| 2.6.1.2 Aproximação para sistema de ordem 2 | 53 |
| 2.7 Filtragem de ruído em dados coletados experimentalmente | 56 |
| 2.7.1 Análise de Fourier | 56 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.7.2 | Transformada <i>wavelet</i> | 58 |
| 2.7.2.1 | Transformada <i>wavelet</i> contínua | 59 |
| 2.7.2.2 | Transformada <i>wavelet</i> discreta | 60 |
| 2.7.3 | Remoção de ruídos utilizando transformada <i>wavelet</i> | 63 |
| 3 | MATERIAIS UTILIZADOS E INSTRUMENTAÇÃO PROPOSTA..... | 68 |
| 3.1 | Trocador de calor e planta utilizada..... | 69 |
| 3.2 | Instrumentação do processo | 73 |
| 3.2.1 | Equipamentos da instrumentação..... | 75 |
| 3.2.1.1 | Elementos sensores | 79 |
| 3.2.1.2 | Elementos atuadores | 84 |
| 4 | IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO E MÉTODOS UTILIZADOS | 86 |
| 4.1 | Metodologia para obtenção das curvas de resposta de vazão e temperatura | 86 |
| 4.2 | Metodologia para sintonia dos controladores..... | 88 |
| 4.3 | Metodologia para obtenção de modelo simplificado da etapa de enxágue..... | 89 |
| 4.3.1 | Execução da sujidade | 91 |
| 4.3.2 | Execução da pré-sanitização..... | 91 |
| 4.3.3 | Execução do enxágue: remoção da solução detergente com água e monitoração do pH | 92 |
| 4.3.3.1 | Enxágue com variação da temperatura..... | 93 |
| 4.3.3.2 | Enxágue com variação da vazão | 94 |
| 4.3.4 | Modelos aproximados da etapa de enxágue | 94 |
| 4.4 | Filtragem dos sinais..... | 94 |
| 5 | RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÕES..... | 98 |
| 5.1 | Curvas de respostas de vazão e temperatura | 98 |
| 5.2 | Sintonias dos controladores de vazão e temperatura..... | 100 |
| 5.2.1 | Sintonia do controlador da vazão do fluido de processo..... | 103 |

| | | |
|-------------------|---|------------|
| 5.2.2 | Sintonia do controlador da temperatura de saída do fluído de processo | 104 |
| 5.3 | Análise da curva de resposta do phmetro utilizado | 105 |
| 5.4 | Pré-analise das curvas de pH..... | 106 |
| 5.5 | Curvas do pH segundo variações de temperatura..... | 108 |
| 5.6 | Curvas do pH segundo variações de vazão | 109 |
| 5.7 | Identificação de modelo simplificado da etapa de enxágue | 111 |
| 6 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS..... | 117 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 119 |
| APÊNDICE A | - Esquema elétrico das entradas e saídas dos periféricos..... | 125 |
| APÊNDICE B | - Esquema elétrico das conexões do inversor de frequência | 126 |
| APÊNDICE C | - Parâmetros teóricos para sintonia dos controladores..... | 127 |
| APÊNDICE D | - Painel frontal e diagrama em blocos do programa para coleta dos dados em plataforma LabVIEW® | 128 |
| APÊNDICE E | - Painel frontal e diagrama em blocos do programa dos controladores e obtenção de valores de pH em plataforma LabVIEW® | 130 |
| APÊNDICE F | - Programa em MATLAB® para obtenção do modelo de 2^a ordem / | |
| | Modelo em SIMULINK para simulação dos modelos de 1^a e 2^a ordem | 132 |

1 INTRODUÇÃO

Em todas as fases da civilização humana a conservação dos alimentos fez-se necessária para garantir a qualidade do principal combustível de nosso organismo, buscando eliminar ou inibir agentes de transformação químicos, bioquímicos e biológicos. Ao longo do tempo foram desenvolvidos diversos processos de conservação: secagem, salgamento, defumação, isolação de agentes oxidantes, controle de temperatura, pasteurização¹, entre outros.

Chegando a era industrial, os alimentos passaram a ser processados e diversas tecnologias foram criadas e empregadas para a sua elaboração, manuseio, conservação e transporte, despertando significativa preocupação na eficiência dos programas de higienização, sendo que os métodos adotados devem considerar as instalações, utensílios, equipamentos e manipuladores.

Considerando que a higiene, limpeza e assepsia de todas as etapas do processamento na indústria alimentícia são fundamentais para a segurança e qualidade dos alimentos, é primordial a implantação de programas de sanitização². Devido à diversificação dos produtos industrializados, estes programas devem ser quase que específicos a cada produto elaborado.

Nestes processos, o contato dos alimentos com superfícies mal higienizadas pode aumentar a incidência de microrganismos prejudicando sua qualidade. A presença de resíduos também ocasiona problemas operacionais nos equipamentos, pois acarreta queda dos rendimentos nas trocas térmicas e aumento de perda de carga do sistema. Esses fatores são suficientes para justificar a importância da execução de um correto plano de higienização dos insumos utilizados no processamento de alimentos.

Por serem procedimentos que requerem paradas de produção, os processos de higienização, muitas vezes, são realizados de forma negligenciada pelas empresas. Portanto, é de fundamental importância que sejam estudados e otimizados, através do estabelecimento das cinéticas de remoção de resíduos de cada etapa do processo.

¹ Técnica elaborada por Louis Pasteur, que consiste em tratamento térmico para eliminar os microorganismos presentes em produtos alimentícios (TETRAPAK, 2011).

² Sanitização trata-se da redução da população microbiana, conforme citações ao longo do capítulo 2.

O estabelecimento do tempo adequado ao processo de higienização é fundamental para a eficiência do processo. Deve ser suficientemente longo para que as reações químicas e as interações físicas ocorram a contento; mas não deve ser excessivo, pois reduziria a produtividade da indústria.

O processo escolhido para este estudo é caracterizado por efetuar a higienização nas máquinas utilizadas sem a desmontagem dos componentes e de forma cinética, denominado sistema CIP (*Clean in Place*) (ANDRADE; MACEDO, 1996; GIBSON et al., 1999; JEURNINK; BRINKMAN, 1994), de reconhecida eficiência na remoção de tipos de resíduos que possam resultar na proliferação de microorganismos e, por sua vez, contaminar alimentos que venham a ser processados no ciclo seguinte.

Dois parâmetros envolvidos no processo CIP despertam especial interesse: vazão de escoamento e temperatura. O primeiro está relacionado com a ação cisalhante proporcionada pela água sobre a superfície, enquanto o segundo permite melhor solubilização dos resíduos, facilitando sua remoção.

Em um processo CIP, o tempo de escoamento das soluções, em cada etapa do processo de higienização, é o parâmetro de maior facilidade de manipulação e, por isso, o fator preferido de redução para otimização de custos. Porém, se alterado de forma não criteriosa pode ocasionar a não efetividade do processo.

A prática de higienização de equipamentos pela indústria de alimentos normalmente baseia-se em experiências empíricas, deixando o setor à mercê de informações provenientes dos fornecedores de detergentes e sanitizantes. Parâmetros semi-empíricos são adotados a partir de resultados finais de higienização considerados satisfatórios. A complexidade dos fenômenos existentes nas reações de remoção requer o aumento de trabalhos científicos que possam contribuir com os procedimentos adotados industrialmente.

O equipamento utilizado como base de estudo foi um trocador de calor do tipo feixe tubular (MARTIN, 2006) instalado na Planta Piloto do Bloco I do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia (CEUN-IMT), submetido à incrustação por leite em seus tubos internos. Este tipo de trocador de calor é bastante utilizado na indústria de derivados de leite, porém de difícil higienização, pois as temperaturas envolvidas durante seu funcionamento acarretam, entre outros, desnaturação protéica que dificulta a retirada dos resíduos, obrigando

a realização de paradas mais frequentes. Neste tipo de equipamento, o sistema de higienização adotado mais comumente é o CIP, por propiciar maior rapidez ao processo, e por não haver necessidade de realização de desmonte do equipamento.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos a instrumentação de um processo de limpeza CIP aplicado nos tubos internos de um trocador de calor e a identificação de modelos experimentais do comportamento dinâmico da etapa de enxágue de tal processo.

Pretende-se relacionar a variação, ao longo do tempo, da alcalinidade (pH) da água empregada para remoção do detergente alcalino utilizado no processo de limpeza com a temperatura e vazão da mesma. Dessa forma, e utilizando a instrumentação proposta, tem-se também como outro objetivo avaliar qualitativamente a sensibilidade da variação da alcalinidade da etapa de enxágue quanto à vazão e temperatura empregadas, visando obter um melhor entendimento de como essas variáveis influenciam no tempo necessário para a conclusão dessa etapa em um processo CIP.

1.2 CONTRIBUIÇÕES

Diferentemente de outros estudos realizados (RESTO, 2007; GÖNDER, 2009; BREMER, 2005), onde se utilizaram pequenos modelos de bancada para estudo de fenômenos ligados ao processo de limpeza CIP, neste trabalho a planta utilizada possui dimensões de uma planta industrial típica. Tal característica possibilita que se considerem as dinâmicas e fenômenos encontrados em plantas reais, obtendo-se resultados de grande interesse prático.

Uma das contribuições deste trabalho refere-se à instrumentação proposta. Utilizou-se de equipamentos (sensores, interfaces e atuadores) padrão de mercado, adequadamente combinados e instalados de maneira a permitir o estudo de vários aspectos relacionados às etapas de um processo CIP. Também, foram desenvolvidos algoritmos computacionais, baseados na plataforma LabVIEW® - Laboratory Virtual Instrumentation Engineering

Workbench - National Instruments Co. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010), que permitem gerenciar e controlar tais equipamentos de maneira efetiva, com funções de aquisição de dados e controle. Tanto o ambiente de *software* desenvolvido quanto a instrumentação sugerida possuem portabilidade imediata para aplicações similares em escala industrial. Aspectos de filtragem usando transformada *wavelet* são também sugeridos e aplicados, permitindo reduzir de maneira significativa o ruído de dados obtidos, mostrando ser efetivo seu uso em processos como aqui abordados.

Outra contribuição relevante refere-se à etapa de enxágue de um processo CIP. Utilizando-se a instrumentação e *software* propostos, a influência da vazão e temperatura em tal etapa é avaliada e modelos simplificados são obtidos, possibilitando um melhor entendimento do comportamento dessa etapa de limpeza. De tais modelos, sugere-se uma forma de estimar, aproximadamente, o tempo necessário para a execução de tal etapa, permitindo otimizações futuras quanto ao consumo de água e energia envolvidas, objetivando-se reduzir custos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, contendo uma visão geral dos principais temas utilizados e estudados; o capítulo 3 aborda a planta utilizada bem como os instrumentos escolhidos e usados para a elaboração de seu controle e instrumentação; o capítulo 4 abrange a metodologia empregada para se alcançar os objetivos propostos, incluindo a identificação da planta, obtenção de controladores de vazão e temperatura e suas implementações. Nesse capítulo também são discutidos os procedimentos para obtenção dos modelos simplificados para a etapa de enxágue e a remoção de ruídos dos dados coletados. No capítulo 5 discutem-se os resultados experimentais obtidos e no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura com descrições sobre o processo de limpeza CIP, sobre identificação experimental de sistemas, bem como dos equipamentos envolvidos e utilizados, incluindo a citação de referências bibliográficas pertinentes. Baseando-se nessas informações, foi definida a metodologia a ser empregada vislumbrando alcançar os objetivos propostos.

2.1 Considerações preliminares sobre higienização e sanitização de equipamentos

A qualidade do produto final de empresas como processadoras de alimentos, bebidas ou fármacos, certamente será comprometida caso não haja cuidados específicos no que diz respeito à limpeza e a subsequente esterilização ou desinfecção de qualquer item ou equipamento da instalação industrial (ANDRADE; MACEDO, 1996).

A higienização das superfícies que têm contato com alimentos é feita em duas principais etapas distintas de acordo com SCHMIDT (1997):

- **limpeza** é a remoção total de resíduos sólidos presentes nas superfícies através da utilização de detergentes químicos;
- **sanitização** é a redução da população microbiana até níveis considerados seguros para a saúde pública.

O processo de limpeza e higienização desse tipo de indústria seria grandemente facilitado se os equipamentos e tubulações usados em seu processamento pudessem ser desmontados, postos em uma pia, vigorosamente escovados e então esterilizados para remover os contaminantes (HARROLD, 2000). Obviamente que as técnicas de limpeza utilizadas em laboratório são impraticáveis na maioria das instalações industriais de grande escala de produção. O Processo de Limpeza no Local (CIP) é um dos processos de limpeza mais comumente utilizados na indústria para assegurar que as tubulações e os equipamentos estejam livres de contaminantes orgânicos e inorgânicos.

O processo de higienização das instalações em que o alimento é processado é um importante fator em sua qualidade, segurança e palatabilidade. As superfícies de

equipamentos ou utensílios que entram em contato com alimentos, durante o processo de industrialização, podem provocar contaminação ou aumento da incidência de microrganismos (ANDRADE; MACEDO, 1996).

O objetivo da higienização de superfícies é a remoção de restos de nutrientes que possam favorecer o desenvolvimento de bactérias e a eliminação das mesmas (SCHMIDT, 1997). Para alcançar tais objetivos, um processo de higienização deve ser elaborado a partir das características específicas dos resíduos presentes no equipamento e dos recursos disponíveis para removê-los.

Conforme a Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnológica de Alimentos (SBCTA, 2000), as principais fontes de contaminação microbiana nos alimentos são:

- (i) matérias-primas ou ingredientes;
- (ii) homem;
- (iii) água;
- (iv) ar ambiental;
- (v) pragas e insetos;

A higienização adequada de um equipamento é fundamental para a remoção das sujidades que ocorrem em consequência dos microorganismos presentes na matéria-prima processada aderirem aos resíduos sólidos surgidos após a passagem da mesma em um equipamento (REINEMANN; RABOTSKI, 1993). Fica evidente, então, a necessidade de um correto programa de higienização de equipamentos, a fim de se retirar as sujidades decorrentes do sistema produtivo. Por exemplo, um trocador de calor utilizado na indústria de laticínios deve ser higienizado diariamente para manter seus padrões de qualidade, de acordo com BANSAL e CHEN (2006).

Portanto, sendo a higienização do equipamento adequada, poderá reverter em benefícios econômicos ao setor industrial. De acordo com JUN e PURI (2005), custos gerados pelos resíduos incrustados estão envolvidos nas paradas de produção para manutenção e reparo dos equipamentos, na perda de produção, no excessivo uso de água e na perda de energia. A presença de resíduos não só propicia condições para a proliferação de microrganismos, como também afeta as condições de operação dos trocadores de calor. Isto porque reduz as taxas de transferência de calor provocando sub-processamento do produto, devido a não se atingir as

temperaturas necessárias para a realização dos tratamentos térmicos, como pasteurização e esterilização. Tal fato propicia condições para o desenvolvimento de uma microbiota deteriorativa e/ou patógena durante o armazenamento do produto. A presença de resíduos sobre as superfícies também aumenta os níveis de queda de pressão no equipamento por aumentar a rugosidade superficial (BANSAL; CHEN, 2006; FRYER et al., 2006).

Durante o processo de limpeza, podem ser utilizadas soluções fortemente alcalinas, no entanto, deve-se neutralizá-las após sua utilização, para que o pH diminua, e somente então descartá-las (SCHMIDT, 1997). Os custos envolvidos com a utilização de produtos químicos e com o impacto ambiental também são citados por GILLHAM (2000 apud BANSAL; CHEN, 2006), FRYER et al. (2006), sendo que a principal preocupação dos efluentes, do ponto de vista ambiental relacionada ao processo de higienização, é o pH das soluções envolvidas.

Para ASSELT et al. (2005), mais de 80 % dos custos envolvidos nos processos das indústrias de derivados lácteos estão relacionados aos processos de higienização de equipamentos. Uma confirmação é o custo à indústria leiteira holandesa, estimados em mais de US\$ 40 milhões, devido ao problema da formação de resíduos, segundo BEUF et al. (2003). Também de acordo com GIESE (1991), a aplicação de um correto programa de higienização não é somente responsável por uma produção segura, livre de perigos microbiológicos ou químicos, mas também deve ser entendida como de interesse para a saúde pública. Justifica-se então procurar por modelos que possibilitem entender e identificar tais processos, buscando uma regularidade nos procedimentos de higienização e diminuição dos custos envolvidos.

A adesão de microorganismos em um equipamento é propiciada pela formação de resíduos por fornecer substrato aos mesmos (BANSAL; CHEN, 2006). Os microorganismos que não foram retirados por um ineficiente processo de higienização podem se depositar, aderir, ou interagir com os resíduos e as superfícies. Ao se instalarem, passam a se multiplicar, formar colônias e agregarem nutrientes e resíduos. Dessa forma, uma estrutura denominada biofilme instala-se no equipamento, que além de tornar-se fonte de contaminantes microbianos, pode diminuir a transferência de calor, desencadear processos corrosivos e diminuir o fluxo de produtos em tubulações (ANDRADE; MACEDO, 1996; MITTELMAN, 1998). A presença do biofilme também provoca a contaminação do alimento

por microrganismos que podem gerar toxinfecções de origem alimentar. Cerca de 200 doenças podem ser veiculadas pelos alimentos e causadas por bactérias, fungos, vírus, parasitas que podem ser evitadas através de um processo de higienização correto (ANDRADE; MACEDO, 1996).

A seguir apresentam-se algumas definições relacionadas ao processo de limpeza de um equipamento, segundo SBCTA (2000):

- (i) **Esterilização:** processo físico ou químico utilizado a fim de inativar todas as formas viáveis de microorganismos existentes no produto;
- (ii) **Sanitização:** procedimento que envolve diferentes processos, visando obter o grau de higiene e limpeza adequadas em todos os componentes do ambiente de trabalho, reduzindo assim os microorganismos presentes a um número compatível ao produto;
- (iii) **Desinfecção:** processo para eliminar os microrganismos patogênicos, sem eliminar, necessariamente, todas as bactérias e esporos;
- (iv) **Assepsia:** tomada de medidas preventivas ou técnicas especiais que visam proteger determinada área ou objeto da contaminação por microrganismos;
- (v) **Higienização:** redução a níveis microbianos não nocivos à saúde ou deteriorantes.

A realização da sanitização pode ocorrer de maneira térmica, através utilização de água quente ou vapor; ou química, pela ação de agentes sanitizantes químicos como hipoclorito de sódio, ácido peracético, cloretos de benzalcônio entre outros (SCHMIDT, 1997; REED, 1992).

Conforme ANDRADE e MACEDO (1996), REINEMANN e RABOTSKI (1993) e PASSOS (1992), um eficiente processo de higienização é conseguido com a otimização dos quatro principais fatores envolvidos neste processo: energia mecânica, energia física, energia química e o tempo de contato dos produtos utilizados com as superfícies a serem higienizadas. A energia mecânica é utilizada para estabelecer o contato entre os resíduos e os microrganismos com os agentes de higienização. Pode ser empregada de forma manual ou pela circulação de soluções no interior de tubulações e equipamentos fechados como a utilizada em sistemas CIP, onde a tensão de cisalhamento, aplicada pelo fluxo dos agentes de higienização em um equipamento, promove a remoção de resíduos (JEURNINK;

BRINKMAN, 1994; ANDRADE; MACEDO, 1996; GIBSON et al., 1999). As temperaturas mais elevadas podem aumentar a eficiência do processo, portanto a energia térmica facilita o processo de higienização, pois os efeitos químicos aumentam linearmente com a temperatura. No entanto, limitações são verificadas na utilização deste fator em função do processo de limpeza e o tipo de resíduo que deverá ser removido (ANDRADE; MACEDO, 1996; GIBSON et al., 1999).

No momento da realização das reações que ocorrem durante o processo, a energia química é utilizada como saponificação de gordura e peptização de proteínas por agentes alcalinos, solubilização de resíduos minerais por agentes ácidos e diminuição da carga microbiológica pela ação de agentes sanitizantes. As reações sobre os resíduos reduzem suas forças de adesão às superfícies (ANDRADE; MACEDO, 1996; GIBSON et al., 1999). Outro fator fundamental à eficiência do processo é o tempo atribuído à limpeza e sanitização, devendo ser suficientemente longo para que as reações químicas ocorram a contento, observando que as reações químicas de higienização ocorrem com maior eficiência nos minutos iniciais de contato. Por outro lado, tempos excessivos diminuem a produtividade da indústria, pois elevam seus custos, principalmente devido à parada de produção e elevação do volume de efluentes que precisará ser tratado posteriormente (ANDRADE; MACEDO, 1996).

Para as técnicas modernas, o grande desafio da higienização é aumentar sua efetividade e diminuir seus custos. Parâmetros envolvidos no processo como temperaturas, concentrações e volume de soluções devem ser reduzidos tanto quanto possível. Mais um fator importante a ser considerado: a água utilizada nas diferentes etapas do processo. Reduzir a quantidade de água proporciona economia pela minimização do custo da própria água, da energia utilizada para seu aquecimento e de reagentes químicos para preparo das soluções; além de evitar gastos excessivos com o tratamento de efluentes (MROZEK, 1985).

2.2 Os sistemas de higienização empregados

Os tipos de sistemas de higienização, quanto à sua realização, podem ser classificados como: processo manual, por imersão, aspersão ou pelo sistema CIP (LEITÃO, 1975; GIESE, 1991), onde a seleção da metodologia a ser empregada depende do tipo de operação e do resíduo que deverá ser removido.

No sistema manual, utilizam-se detergentes pré-selecionados, em temperaturas tipicamente entre 46°C e 49°C e aplicados com escovas ou esponjas. Raspadores, esguichos de alta e baixa pressão também podem ser utilizados como auxiliares no processo de limpeza. O sistema de imersão é utilizado na limpeza de utensílios, componentes de equipamentos, válvulas, além do interior de tachos e tanques. Esses são tratados previamente com água morna e, posteriormente, são sujeitos à solução detergente à temperatura em torno de 52°C. Ao final do processo são escovados e lavados com água quente. O sistema de aspersão é utilizado para limpeza de interiores de tanques principalmente de equipamentos de difícil acesso como, por exemplo, esteiras transportadoras.

A utilização do sistema CIP na higienização tem substituído os processos de limpeza manual de equipamentos que trabalham com alimentos líquidos tais como leite, cerveja, bebidas não alcoólicas, entre outros, sendo mais empregados na limpeza e sanitização de tanques, trocadores de calor, tubulações e homogeneizadores (FORSYTHE; HAYES, 2002; GIESE, 1991). Aparentemente seu custo é alto, no entanto, torna-se, com o tempo, mais econômico devido às vantagens que oferece (FORSYTHE; HAYES, 2002), a saber (SHARP, 1985 apud KUNIGK, 1998):

- (i) menor custo com mão de obra;
- (ii) funcionamento mais econômico com aproveitamento ótimo das soluções utilizadas;
- (iii) melhores níveis alcançados na higienização, desde que todas as etapas sejam cumpridas corretamente;
- (iv) maior rapidez e aumento da produtividade por não haver necessidade de desmonte de equipamentos;
- (v) menor desgaste mecânico de tubulações e equipamentos pela não necessidade de desmontagem (LEITÃO, 1975);
- (vi) redução do custo com produtos de higienização, pois os mesmos podem ser reutilizados;
- (vii) redução de erros humanos associados à limpeza manual, pois todas as etapas podem ser controladas automaticamente;
- (viii) maior segurança dos funcionários pois estes não precisam entrar nos equipamentos para realizar a limpeza manual e nem manipular soluções concentradas e aquecidas dos produtos de limpeza e sanitização.

Os parâmetros operacionais que garantem a eficiência neste processo são basicamente: o tempo, a temperatura, a concentração dos agentes de limpeza e o grau de turbulência do escoamento (TURNER, 1982 apud KUNIGK, 1998; REINEMANN; RABOTSKI, 1993).

Em combinação com tempo, temperatura e concentração, a taxa de escoamento das soluções deve ser dimensionada adequadamente para um sistema CIP. Não somente para permitir o contato adequado do detergente com o resíduo, mas também para criar um estado de turbulência adequado para facilitar a remoção.

O tempo é o fator de controle no processo CIP de mais fácil modificação e, também, o mais pressionado pelos operadores, pois se procura sempre reduzi-lo (KUNIGK, 1998). A redução deve ser feita de forma criteriosa, pois tempo de contato insuficiente proporciona uma inadequada ação dos agentes de limpeza.

O tempo de passagem da água durante as etapas de pré-lavagem e de enxágue de um processo CIP, os quais serão descritos em 2.4, deve ser corretamente estimado, pois o reduzindo em demasia, pode-se levar a uma remoção ineficiente de resíduos e de detergente. Por outro lado, se for aumentado sem critério, geram-se grandes volumes de efluentes, acarretando maiores custos para a empresa (KUNIGK, 1998).

Sistemas CIP podem ser automatizados de modo a regular automaticamente as concentrações, as temperaturas das soluções e suas taxas de escoamento. Contudo, de acordo com FRYER et al. (2006), embora tais processos sejam altamente desenvolvidos e automatizados, os mesmos raramente são otimizados. Então, o estudo e identificação de tais processos são importantes para a busca de otimização.

Cabe ressaltar que problemas de incrustações podem ocorrer pela falta de cuidado ao realizar procedimentos de higienização periódicos, potencializados em indústrias onde o sistema CIP está instalado. Mesmo com o sistema CIP implantado, é conveniente destacar que algumas partes do sistema devem ser higienizadas manualmente, como estruturas presentes em tanques tais como agitadores, gaxetas, coletores de amostras, válvulas, envasadoras como copos e pistões, correntes de movimentação e calefatores (BARNARD et al., 1992).

2.3 Fatores relevantes que participam do processo de deposição de resíduos em um trocador de calor

Cabe inicialmente ressaltar a diferença entre sujeira e resíduo (MARRIOT, 1994): sujeira é o material errado no lugar errado; resíduo não é apenas sujeira, mas também compostos orgânicos que são encontrados tipicamente no processamento de alimentos.

Considerando que o leite é um produto de complexa composição química, seu beneficiamento é alvo de importante cuidado com a higienização e limpeza dos equipamentos envolvidos, senão um dos mais complexos. Os fatores que interferem na deposição dos resíduos são enumerados por BANSAL e CHEN (2006). Segundo esses autores, a composição do leite e as condições de operação e características do trocador de calor são fatores interferentes desse processo.

A formação de incrustações é facilitada, dentre outros fatores, com a presença de ar, com o regime de escoamento do fluído, com a temperatura de processo, com as características de superfície de troca térmica, com a composição da água de aquecimento do sistema e com o uso inadequado de agentes químicos durante o processo de higienização. A presença de bolhas de ar, formadas no interior do trocador de calor, facilita a deposição de resíduos, pois elas agem como núcleos de deposição (JONG, 1997 apud BANSAL; CHEN, 2006). A turbulência de escoamento do fluído dentro do trocador diminui a taxa de formação de resíduos para BELMAR (1993 apud BANSAL; CHEN, 2006). A temperatura da superfície do trocador de calor é o fator operacional de maior influência na formação de resíduos. Segundo BALA (1998 apud BANSAL; CHEN, 2006) aumento da temperatura de processo resulta em aumento de resíduos.

Os resíduos minerais, apontado segundo TURNER (1982), resultam da utilização de água dura³. O simples aquecimento ou alcalinização desta água, para a sanitização da superfície e adequação da mesma às temperaturas de operação, provoca a precipitação dos sais nela contidos, que originará rugosidades na superfície, onde se depositarão proteínas, gorduras e microrganismos. Rugosidades, rachaduras e corrosão da superfície do trocador de calor podem ser propiciadas pelo uso de agentes químicos incorretos. Dessa forma, é

³ Água que possui sais de cálcio, magnésio e ferro (REED, 1992).

necessária a correta escolha dos agentes a serem empregados no processo de higienização (SCHMIDT, 1997).

Outro fator de contribuição para a formação de incrustação é a presença de íons de cálcio e fosfato no leite. Fosfatos de cálcio, presentes no meio, contribuem para o avanço da formação de resíduos por criar ligações “carboxiladas” entre proteínas agregadas e minerais precipitados.

O tempo que o leite circula no trocador de calor, também é fator decisivo direto na quantidade de resíduo que adere mais firmemente à superfície do equipamento (MIDDLEMISS et al., 1985). É importante observar, porém, que, na formação de resíduos, existe um intervalo de tempo, denominado período de indução, no qual não se verifica nenhuma modificação no coeficiente de transferência de calor devido aos resíduos (FRYER et al., 2006).

O simples fato de a desnaturação e agregação de proteínas ocorrerem assim que o leite sofre aquecimento, causam, inevitavelmente, a formação de resíduos em trocadores de calor. No entanto, estes podem ser reduzidos, desde que adequadas condições térmicas e hidráulicas de processamento sejam utilizadas, como aumento na taxa de escoamento e diminuição das temperaturas de processo (BANSAL; CHEN, 2006).

Durante o processo de limpeza, utilizam-se compostos detergentes (SCHMIDT, 1997) para a eliminação de resíduos. Os detergentes contêm, em sua formulação, diversos compostos químicos que agem sobre os resíduos de diferentes maneiras. Estes podem ser classificados como: compostos fisicamente ativos, que alteram a solubilidade e a estabilidade coloidal do resíduo; compostos quimicamente ativos, que modificam os componentes dos resíduos tornando-os mais solúveis e, consequentemente, mais fáceis de serem removidos (SCHMIDT, 1997). A Tabela 1 ilustra os tipos de resíduos e os tipos de detergentes a serem utilizados.

Portanto, a escolha de tais compostos detergentes para a limpeza, que quimicamente ativos se subdividem em duas classes: alcalinos e ácidos (SCHMIDT, 1997), depende do tipo de resíduo presente no equipamento a ser limpo, sendo estes classificados em: orgânico ou inorgânico. Segundo MARRIOT (1994), resíduos orgânicos, como aqueles gerados no beneficiamento de leite, são removidos com mais eficiência utilizando-se compostos

alcalinos⁴. Depósitos inorgânicos, por outro lado, devem ser tratados por produtos ácidos (pH abaixo de 7,0).

| Tipo de resíduo | Subclasse do resíduo | Exemplos de deposição | Componente requerido na limpeza |
|------------------------|-----------------------------|---|--|
| Inorgânico | Depósitos de água dura | Carbonatos de Cálcio e Magnésio | |
| | Depósitos metálicos | Ferrugem, outros óxidos | Limpador tipo ácido |
| | Depósitos alcalinos | Filmes deixados por enxágue impróprio após o uso de limpador alcalino | |
| Orgânico | Depósitos de alimentos | Resíduos de alimentos | |
| | Depósitos de petróleo | Óleos lubrificantes, graxa, outros produtos para lubrificação | Limpador tipo solvente |
| | Depósitos não de petróleo | Gordura animal e óleos vegetais | |

Tabela 1 - Classificação de resíduos orgânicos e inorgânicos (MARRIOT, 1994).

A seguir, serão descritos os detergentes quanto aos seus tipos.

2.3.1 Solução detergente alcalina

A remoção de gorduras, proteínas, carboidratos e diminuição da carga microbiana, ocorrem de modo eficiente quando submetidas à utilização de soluções alcalinas para tal fim (ANDRADE; MACEDO, 1996; SCHMIDT, 1997; JEURNINK; BRINKMAN, 1994; GIESE, 1991). A ação dos detergentes alcalinos na gordura ocorre através da ação emulsificante ou saponificante⁵ de seus ingredientes (SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975).

As camadas formadoras dos resíduos são removidas em ordem inversa à sua deposição (MIDDLEMISS et al, 1985). De acordo com JEURNINK e BRINKMAN (1994) o processo de remoção de resíduos de leite se dá por um prévio inchamento das camadas superiores após

⁴ Alcalinos são agentes químicos que propiciam pH superior a 7,0.

⁵ “Propriedade do detergente de reagir com gorduras, causando sua saponificação, ou seja, transformação em sabões, que são removidos” (LEITÃO, 1975).

contato com detergente alcalino, seguido de sua remoção. As camadas remanescentes, constituídas principalmente por minerais, são removidas pela ação de detergente ácido que deverá ser adicionado posteriormente.

Deve-se salientar que existem detergentes alcalinos com componentes sequestrantes em sua composição, para a remoção dos resíduos minerais, dispensando, algumas vezes, a utilização de detergentes ácidos (JEURNINK; BRINKMAN, 1994).

Considerando os fatos citados, é importante conhecer o tipo do detergente alcalino a ser empregado, podendo ter a seguinte classificação (SCHMIDT, 1997; REED, 1992):

- (i) **alta alcalinidade**⁶: NaOH ou KOH, apresentam grande capacidade de saponificar gorduras, possuem pH superior a 12 e são utilizados para remoção de sujidades mais incrustadas, derivadas de processos nos quais elevadas temperaturas foram utilizadas (GIESE, 1991);
- (ii) **moderada alcalinidade**: de acordo com GIESE (1991), este tipo de detergente apresenta soluções com valores de pH entre 10 e 12, com metassilicato de sódio entre seus componentes. Por sua vez, detergentes contendo carbonato de sódio apresentam baixa alcalinidade, com pH das soluções entre 7 e 10, e sendo utilizado principalmente na lavagem manual das superfícies.

A utilização das soluções alcalinas, independente de sua classificação, deve ocorrer à temperatura superior à do aquecimento do produto (BARNARD et al., 1992). Quanto à concentração do detergente alcalino, esta é dependente do resíduo a ser removido e da alcalinidade ativa do composto.

O hidróxido de sódio (NaOH) é o álcali mais utilizado em equipamentos como trocadores de calor e concentradores, caracterizando-se por possuir o menor custo entre os agentes alcalinos e possuir grande capacidade em remover proteínas e gorduras, além de não provocar a corrosão do aço inoxidável (ANDRADE; MACEDO, 1996; TURNER, 1982).

⁶ Medida da quantidade de álcalis em uma solução (REED, 1992).

2.3.2 Solução detergente ácida

Os detergentes ácidos, assim como os alcalinos, possuem sua concentração de utilização dependente do resíduo a ser removido, no caso dos ácidos essa concentração é baseada em sua acidez ativa (LEITÃO, 1975), sendo sua ação particularizada à remoção de resíduos minerais por transformar os sais insolúveis em água e compostos solúveis (SCHMIDT, 1997; JEURNINK; BRINKMAN, 1994).

2.4 Etapas do processo de higienização CIP

De acordo com BAKKA (1991 apud GIESE, 1991) existem três sistemas CIP diferenciados: sistemas com um, dois ou três tanques. O sistema com um tanque (simples-passo) tem o descarregamento das soluções após a circulação diretamente para rede de captação, sendo este o tipo utilizado neste trabalho. Os outros sistemas reutilizam as soluções e a água de enxágue. Nos sistemas com dois tanques um é destinado à água de pré-enxágue e outro para solução de detergente. Já no sistema com três tanques, repete-se o modelo de dois tanques, com um adicional contendo água potável para enxágue final.

A constituição física típica de um sistema CIP pode ser descrita pelos seguintes itens (KHS - Ziemann Lies, s.d.):

- (i) um tanque utilizado para armazenar a solução de limpeza (detergente);
- (ii) um tanque utilizado para armazenar água quente;
- (iii) um tanque utilizado para recuperação da solução detergente que será utilizada na etapa de pré-enxágue do processo posterior;
- (iv) bomba(s) centrífuga(s) para o transporte dos fluídos;
- (v) trocador de calor;
- (vi) phmetro/condutovímetro;
- (vii) controlador e indicador de temperatura;
- (viii) válvula de controle automático;
- (ix) válvulas solenóides.

As etapas de um processo de higienização adequado são estabelecidas por um procedimento padrão, o qual está ilustrado em formato geral pelo fluxograma da Figura 1.

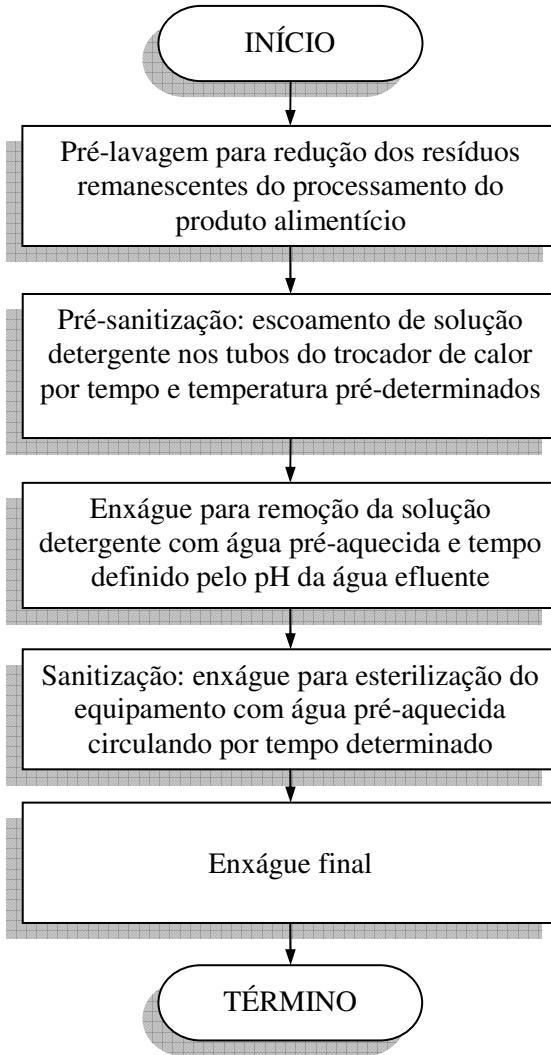


Figura 1 - Fluxograma geral das etapas de um processo CIP.

A seguir são descritas as etapas do processo CIP, com maior detalhamento (SCHMIDT, 1997; ANDRADE; MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; GIESE, 1991).

2.4.1 Pré-lavagem

O objetivo desta etapa é o de reduzir a quantidade de material sólido e/ou líquidos residuais que por ventura permaneçam existentes na superfície do equipamento de processo e também nas tubulações, utilizando somente água. De modo geral, remove os compostos mais fracamente aderidos. Cerca de 90 % dos resíduos solúveis em água podem vir a ser removidos

nesta fase do processo de higienização (ANDRADE; MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; FRYER et al., 2006).

Tipicamente a água deve ter a temperatura na faixa de 38°C a 46°C, pois temperaturas superiores podem provocar desnaturação de proteínas, o que facilita a aderência desses compostos à superfície dos equipamentos; temperaturas mais baixas podem ocasionar a solidificação de gorduras, o que prejudica a eficiência da limpeza (LEITÃO, 1975). O tempo da pré-lavagem, o qual deve ser cuidadosamente estimado, é outro fator importante. Se for intensamente reduzido, resultará em altos níveis de resíduos remanescentes na superfície, o que redundará em rápido esgotamento dos detergentes; se for superestimado, provocará a geração de um volume grande de efluentes, resultando em tratamentos mais custosos (TURNER, 1982).

A etapa de pré-lavagem pode utilizar água recuperada. Adicionalmente, é executado o pré-aquecimento desta água de pré-lavagem para evitar que ocorra o choque térmico no sistema a ser limpo. O aquecimento é feito até a temperatura típica de 50°C, sendo a água recuperada transportada através do sistema formado pelas tubulações e pelo equipamento de processo por meio de bomba centrífuga. A água de pré-lavagem efluente do equipamento do processo é descartada, conforme ilustrado na Figura 2.

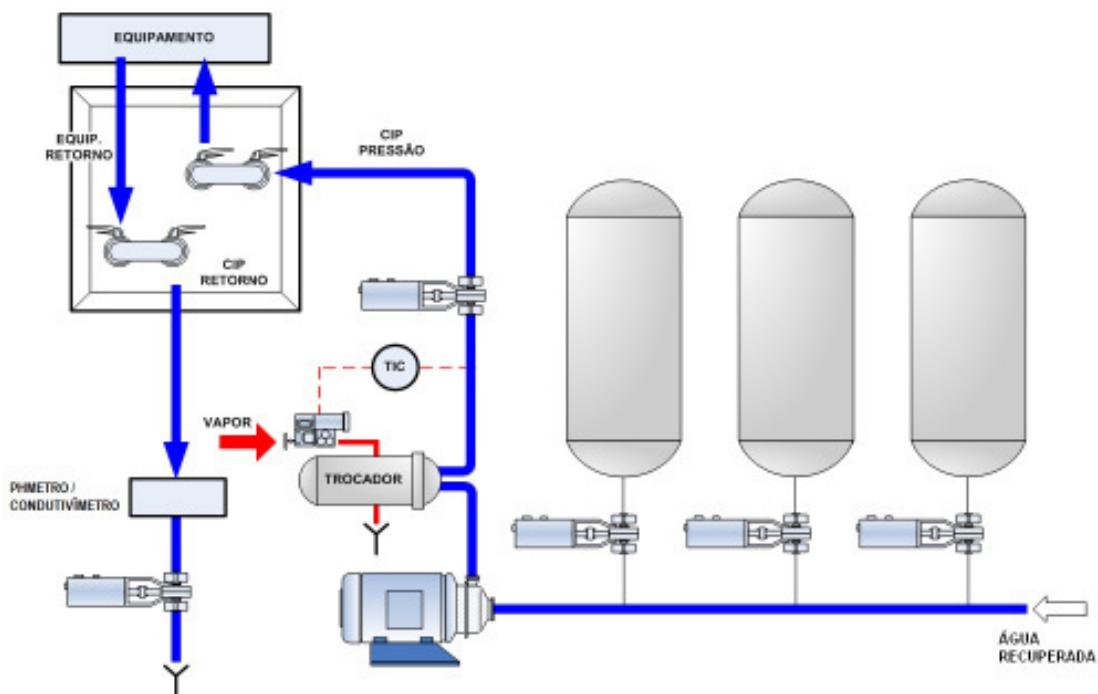


Figura 2 - Pré-lavagem do sistema com água recuperada.

2.4.2 Aplicação de soluções detergentes - pré-sanitização

Esta etapa consiste em aplicar uma solução detergente para a remoção da sujidade mais aderida à superfície que não foi removida na etapa anterior (PASSOS, 1992). A correta realização da etapa de limpeza com detergentes permite que a etapa de sanitização se realize forma adequada, pois a maioria dos sanitizantes reage com matéria orgânica provocando, dessa forma, redução na sua eficiência (HOBBS; ROBERTS, 1997). Além do efeito sobre os resíduos, os detergentes atuam diretamente sobre a população microbiana em uma superfície. Portanto a escolha do tipo do detergente é fundamental à eficiência desta etapa, conforme já descrito no item 2.3.

Para limpeza do equipamento com o produto em estudo, leite (material orgânico), utiliza-se como detergente uma solução de soda cáustica previamente preparada em um tanque aquecido de 40 a 80°C, a qual se faz escoar através do processo em circuito fechado, retornando ao tanque de soda quente como ilustrado pela Figura 3.

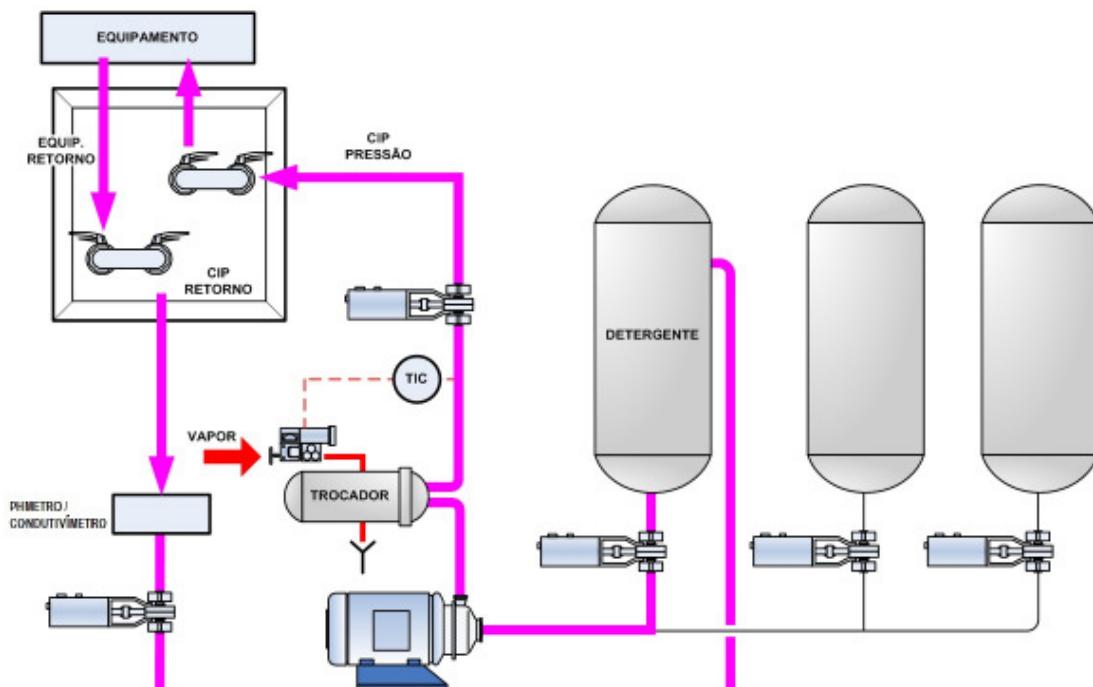


Figura 3 - Limpeza do sistema com solução de soda cáustica como detergente.

Conforme citado em 2.3, um parâmetro notável desta etapa é a concentração dos detergentes. O uso correto da concentração em solução é citado por PARKAR et al. (2003). O detergente apropriado a ser utilizado na solução e, consequentemente, o conhecimento de sua

composição, também é fator decisivo no processo de higienização e remoção do tipo de resíduo.

Outros parâmetros para a remoção da sujidade devem ser observados na realização desta etapa, além da concentração da solução de detergente e sua composição. Devem-se considerar: a temperatura de aplicação; o tempo de contato com o resíduo, que devem ser definidos de acordo com as condições de trabalho existentes (ANDRADE; MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975) e a ação mecânica, que decompõe a sujidade e colabora na sua remoção das superfícies (ANDRADE; MACEDO, 1996). A temperatura de utilização também é de suma importância para sua eficácia. Isso se deve à natureza essencialmente física de sua ação (MIDDLEMISS et al., 1985). O aumento da temperatura acarreta diminuição da viscosidade dos fluídos, o que remete a uma maior turbulência no escoamento e consequente maior ação mecânica na limpeza, condição essa fundamental para uma elevação na eficiência em sistemas de limpeza automáticos (FORSYTHE; HAYES, 2002; LEITÃO, 1975).

O tempo de contato entre sujidades deve ser observado. Existem tempos mínimos e ótimos de ação (ANDRADE; MACEDO, 1996). Estudos realizados mostram que o tempo de contato pode ser reduzido com a utilização de maiores concentrações de detergente ou se for aplicado mais força (KUNIGK, 1998). É importante salientar que tempos mínimos devem ser adequadamente avaliados para garantir uma adequada ação dos componentes químicos (FRYER et al., 2006).

A influência da energia mecânica dá-se devido à fricção, na qual forças de cisalhamento atuam sobre a superfície do equipamento. A intensidade das forças de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de escoamento. No entanto, limites ao fluxo devem ser observados, pois podem ocasionar gastos excessivos no sistema de bombeamento e desgaste das superfícies por abrasão (REED, 1992; FRYER et al., 2006).

Para o dimensionamento da energia mecânica aplicada ao processo, existe outro parâmetro que deve ser analisado, que é o número de Reynolds. Estudos realizados por GALLOT (1984) e LALANDE et al. (1984) determinam que qualquer aumento na taxa de escoamento, resultando em valores de Reynolds entre 10000 e 70000, implica em aumento na eficácia do processo de limpeza.

2.4.3 Enxágue

O produto processado certamente será contaminado caso exista qualquer detergente no equipamento remanescente da etapa da pré-sanitização. Resquícios de resíduos também podem estar presentes. A etapa de enxágue tem por objetivo promover a lavagem do local de processamento com água, removendo os resíduos suspensos pela ação do detergente, evitando que ocorra nova deposição durante a secagem e eliminando as frações residuais das soluções de detergentes aplicadas anteriormente (ANDRADE; MACEDO, 1996; FRYER et al., 2006).

Os fatores envolvidos nesta etapa são exclusivamente físicos, onde o detergente tem ação fisicamente ativa (altera a solubilidade e a estabilidade coloidal do resíduo), conforme citado em 2.3. Pode-se então deduzir que os parâmetros a serem considerados, nesse caso, serão temperatura e vazão da água utilizada. A temperatura terá papel fundamental na solubilidade dos resíduos, enquanto que o escoamento da vazão será responsável em interferir no cisalhamento aplicado sobre a superfície a ser higienizada.

A lavagem intermediária utiliza água tratada proveniente da rede de utilidades. Tipicamente, esta água é pré-aquecida a 50°C com o objetivo de manter aquecido todo o circuito a ser limpo. A água de efluente do equipamento de processo é feita retornar ao tanque de água recuperada, sendo a duração desta etapa definida pelo pH da água efluente. A operação é interrompida quando a concentração de resíduos de soda cáustica na água for inferior a um valor mínimo pré-estabelecido. A Figura 4 ilustra esta etapa do processo.

Como dito anteriormente, deseja-se modelar a dinâmica desta parte do processo buscando otimizar as melhores condições de trabalho em relação à temperatura e vazão utilizadas, e, consequentemente, possibilitar economia de água e energia, quantidades essas que são muito volumosas nos processos industriais (KUNIGK, 1998; FRYER et al., 2006). Tal modelagem pode ainda ser utilizada em estudos de otimizações para outras etapas, como por exemplo, a da sanitização, considerando que esta necessita análises mais específicas para conhecimento da ausência de leite no processo, sendo seu controle com custo mais elevado.

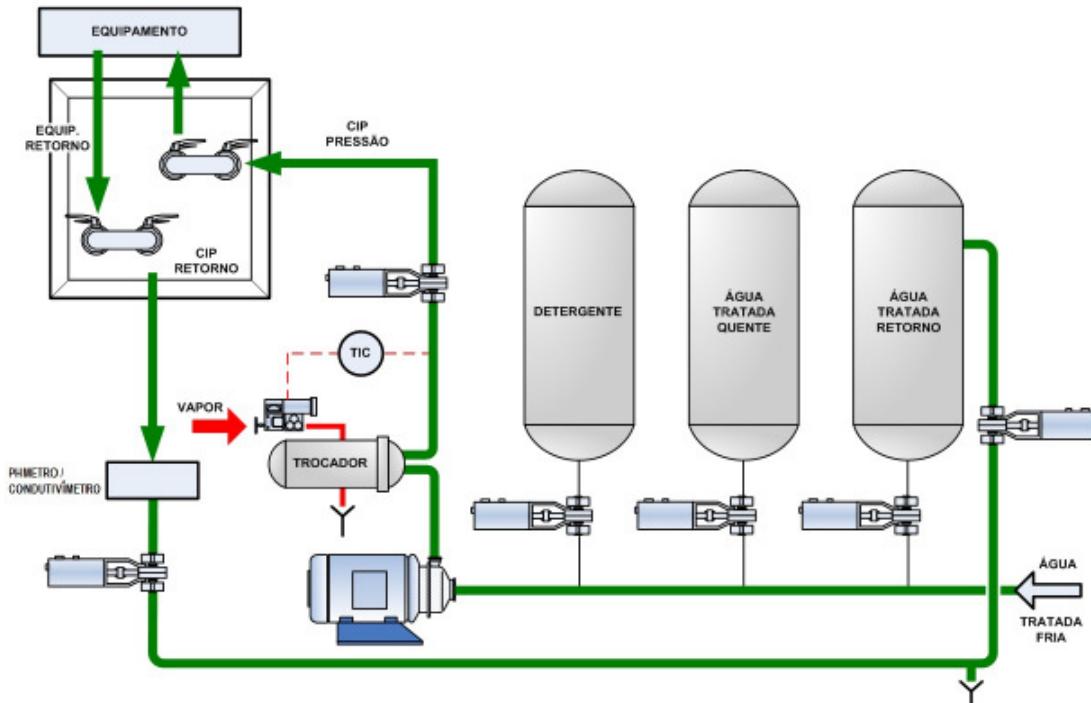


Figura 4 - Etapa de enxágue com água tratada.

2.4.4 Sanitização

O objetivo desta etapa de processo é o de eliminar microrganismos patogênicos e reduzir o número de microrganismos deterioradores até níveis considerados seguros (ANDRADE; MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; REED, 1992).

A sanitização, cuja definição já foi citada em 2.1, pode ser realizada de forma térmica ou química. No primeiro caso, o calor pode ser transferido para a superfície utilizando-se vapor de água ou água quente (SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975; TURNER, 1982). A atividade antimicrobiana destes métodos dependerá principalmente do binômio tempo-temperatura (GIESE, 1991).

A utilização de água quente pode ser realizada na forma de imersão, spray ou circulação de água. Seu custo é relativamente baixo, facilidade de aplicação, rápida disponibilidade do equipamento, efetividade sobre uma grande variedade de microrganismos, relativa não-corrosividade e a sanitização de rachaduras e fendas são as principais vantagens da utilização da água quente.

Já o uso do vapor apresenta aplicação limitada, pois gera custos mais elevados, se comparada com a utilização de água quente: é de difícil operação, pois o tempo e temperaturas de contato são de complexos monitoramentos (SCHMIDT, 1997; TURNER, 1982), apresenta lentidão do processo, alto custo energético, contribuição para a formação de filmes de água e redução da vida útil de certos equipamentos ou parte destes como as gaxetas (SCHMIDT, 1997).

Na utilização de sanitizantes químicos em equipamentos, devem ser considerados fatores importantes: ser aprovado para aplicação em superfícies de contato com alimentos pelos órgãos governamentais competentes, possuir largo espectro de ação microbiológica, agir rapidamente sobre os microrganismos, ser estável e resistente à presença de materiais orgânicos e aos detergentes, ser rapidamente solubilizado, possuir baixo grau de corrosividade e toxicidade, e apresentar baixo custo (SCHMIDT, 1997; GIESE, 1991).

Deve-se ainda salientar que é de fundamental importância, antes de se utilizar sanitizantes químicos, que a superfície seja adequadamente enxaguada, visto que a presença de substâncias orgânicas e/ou inorgânicas, muitas vezes presentes em resíduos de detergentes, pode causar a perda de efetividade do sanitizante por reagir quimicamente com o mesmo, além de proteger fisicamente os microrganismos da ação do agente químico (HONER, 1992).

Portanto, a escolha de um sanitizante depende de uma análise ampla das condições envolvidas e, devido à constante modificação da resistência dos microrganismos, um sistema de rodízio de sanitizantes deve ser implantado (GIESE, 1991). Os tipos de sanitizantes químicos mais utilizados na indústria de alimentos são aqueles à base de cloro, ácido peracético, iodo, compostos quaternários de amônio e peróxido de hidrogênio (ANDRADE; MACEDO, 1996; MITTELMAN, 1998; LEITÃO, 1975; GIESE, 1991).

Tipicamente as indústrias de alimentos no Brasil utilizam soluções detergentes sanitizantes à base de cloro (cloro líquido, hipocloritos, cloroaminas inorgânicas e orgânicas) por apresentarem baixo custo, rápida ação antimicrobiana, não serem afetados pela dureza da água, possuir ação esporicida e serem preparados e aplicados com facilidade (ANDRADE; MACEDO, 1996; SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975). Entretanto, são sensíveis à luz, corroem materiais como aço inoxidável e outros metais, e causam irritação à pele se manuseados inadequadamente (GIESE, 1991).

Tal tipo de solução esterilizante, utilizada na etapa de sanitização, deve ser armazenada em tanque e pré-aquecida a cerca de 80°C, em seguida feita circular através do equipamento em circuito fechado durante, pelo menos, 15 minutos (ANDRADE; MACEDO, 1996). A Figura 5 ilustra esta etapa do processo.

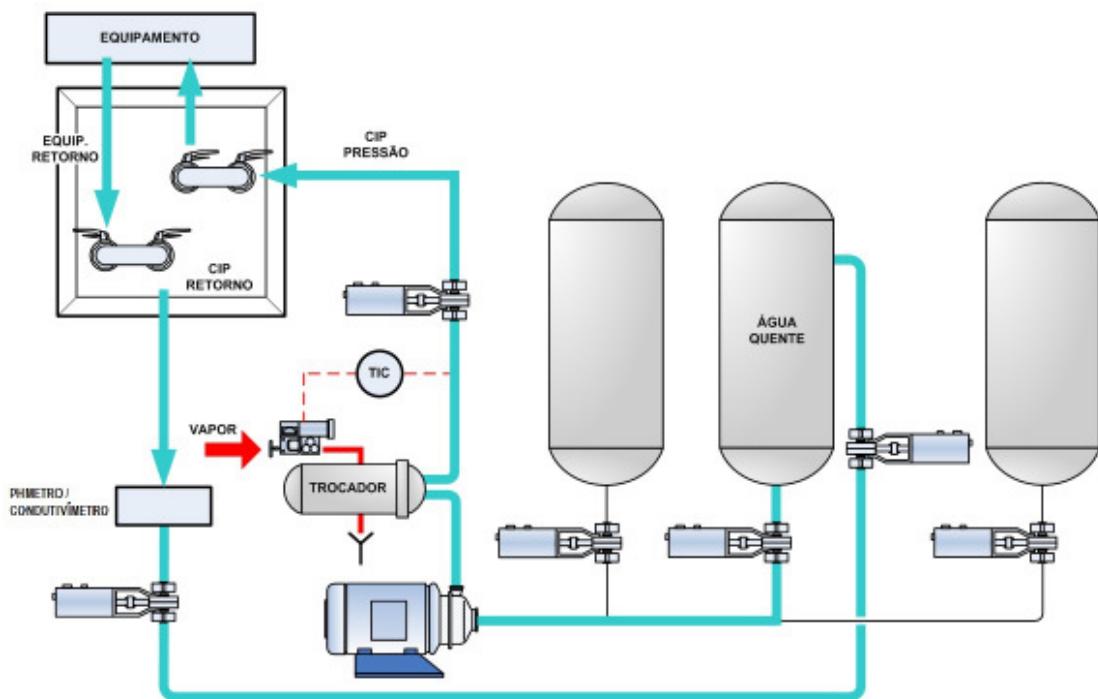


Figura 5 - Sanitização do sistema com água quente.

2.4.5 Lavagem final

Esta etapa consiste na lavagem final do equipamento de processo com água tratada proveniente da rede de utilidades. Tipicamente, esta água é pré-aquecida a 50°C para evitar o choque térmico no equipamento de processo e, na sequência, deve ser gradualmente resfriada até a temperatura ambiente. Este resfriamento gradual visa promover a diminuição da temperatura do equipamento de processo, deixando-o em condições adequadas de posterior utilização (ANDRADE; MACEDO, 1996). A água tratada efluente do equipamento do processo pode ser direcionada ao tanque de água recuperada ou descartada para dreno. A Figura 6 ilustra esta etapa do processo.

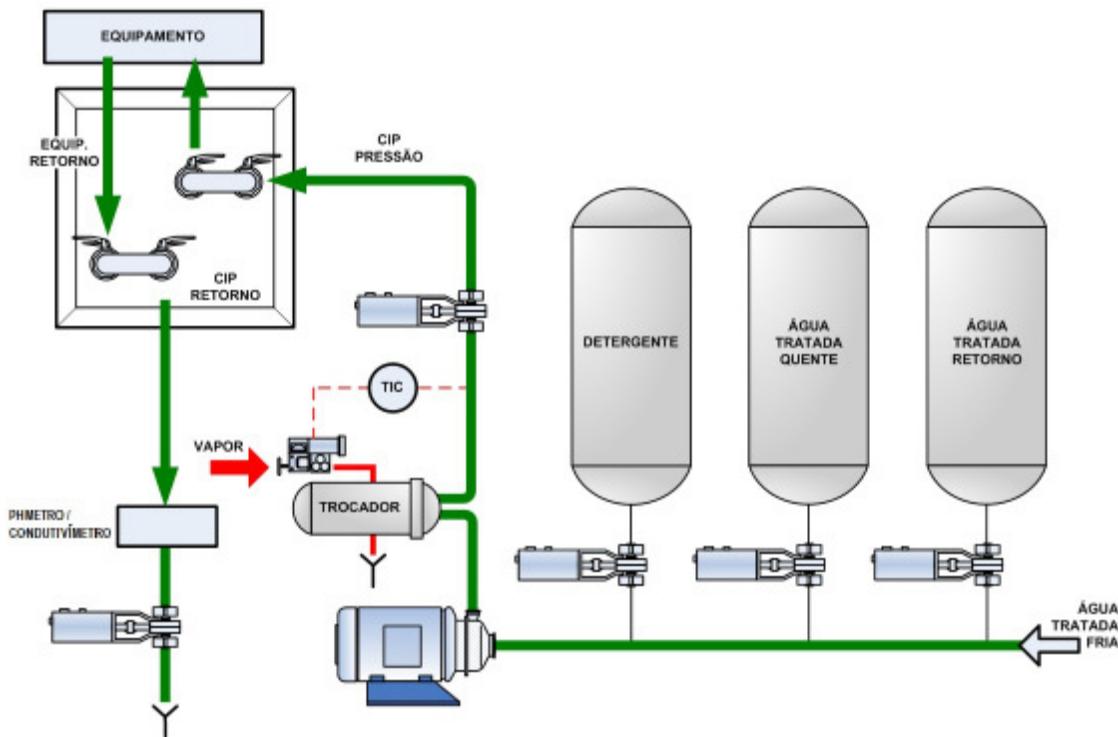


Figura 6 - Resfriamento do sistema com água tratada proveniente da rede.

2.5 Sistema de controle tipicamente empregado em processo CIP

A realização do processo CIP pode ser estabelecida manualmente ou automaticamente, ambos com vantagens e desvantagens. Na forma manual, é o operador do processo quem executa as manobras necessárias nas válvulas e equipamentos, bem como o controle dos parâmetros do processo, a saber: tempos, vazões, temperaturas e concentrações. Nos processos executados de forma automática, é tipicamente empregado um CLP (Controlador Lógico Programável) para executar as sequências de operações requeridas e assim realizar um controle total sobre os parâmetros do processo. Diferentes receitas de controle para sistemas CIP podem ser pré-programadas no CLP, conferindo uma grande versatilidade aos mesmos para a execução de limpeza em diferentes equipamentos. Exemplos de CLPs são ilustrados na Figura 7. A seguir serão apresentadas as vantagens e desvantagens dos processos automáticos relativamente aos manuais.

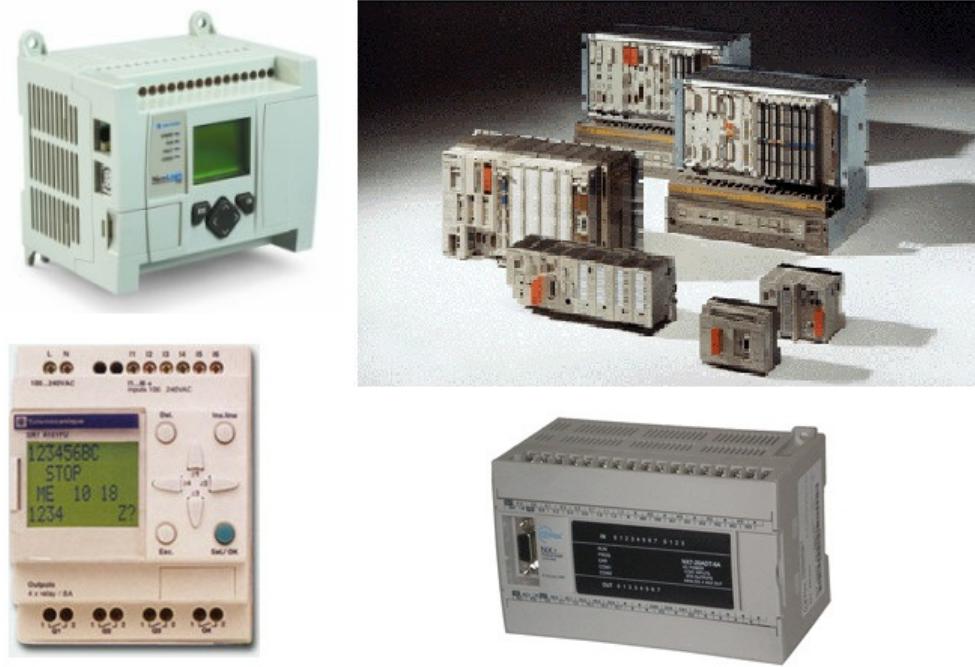


Figura 7 - Controladores Lógicos Programáveis, fonte ROCKWELL (2010).

As vantagens do processo automatizado em relação ao manual são apresentadas, segundo MARRIOT (1994), pelos seguintes aspectos:

- (i) confiabilidade de que todas as etapas foram realmente cumpridas;
- (ii) confiabilidade de que os tempos das etapas foram obedecidos;
- (iii) possibilidade em se obter registro da atividade para efeito de fiscalização e ISO 9000;
- (iv) redução de mão de obra (redução de custos);
- (v) melhoria na higiene devido ao melhor controle das operações;
- (vi) conservação das soluções utilizadas na limpeza;
- (vii) melhoria na utilização dos equipamentos, pois estes podem ser limpos imediatamente após o uso permitindo nova batelada ser iniciada.

Segundo HALL (1971) há significativa redução do custo operacional com a implantação da automação do sistema de limpeza. Segundo este autor, os custos de limpeza manual frequentemente constituem 50 % do custo de mão de obra requerida para todas as fases de produção, desde o recebimento ao processamento, embalagem e entrega. Cita também uma pesquisa realizada em uma instalação industrial de processamento de leite, de porte médio, na

qual foi constatada a redução de até 75 % na mão de obra empregada, quando utilizado um sistema CIP automatizado, em comparação à limpeza manual.

Do ponto de vista das desvantagens do processo automatizado, podem-se enumerar os itens a seguir (MARRIOT, 1994):

- (i) custo de implantação, devido a cada sistema ter características próprias e necessitam de projeto e equipamentos “sob medida”;
- (ii) custo de manutenção é mais elevado devido à sofisticação do equipamento;
- (iii) falta de flexibilidade no sistema caso haja variações nos equipamentos ou produtos a serem processados.

2.6 Identificação de sistemas

Para um processo que necessita ser controlado, o tipo de controlador a ser utilizado bem como seus ajustes são efetivamente melhor selecionados quando há conhecimento de seu comportamento dinâmico. Esse conhecimento normalmente deve ser traduzido na forma de um modelo do processo (ou modelo matemático do processo), que é o primeiro passo na análise de um sistema de controle (OGATA, 1998). Conceitua-se como modelo de processo, qualquer artifício que permita reproduzir a realidade física de um determinado sistema (HANGOS; CAMERON, 2001), sendo que sua dimensão e complexidade dependem do grau de detalhe desejado para o estudo. Desta forma, a modelagem do funcionamento de um equipamento ou de uma planta industrial e, consequentemente, o conhecimento dos mesmos, contribui significativamente na identificação de gargalos de produção ou modificações cabíveis no sentido de melhorar o processo em termos energéticos, com relação à especificação de produtos finais, ou ainda, no consumo de matérias primas (GARCIA, 2005).

A obtenção do modelo matemático de um processo pode ser efetuada por diversos métodos, sendo que os modelos teóricos baseados na Química e na Física do sistema representam uma alternativa. Detalhes sobre esta forma de se obter modelos, intitulada modelagem fenomenológica, podem ser encontrados em GARCIA (2005). Uma vez obtido o modelo do processo, existem diversos métodos disponíveis para a análise do desempenho do sistema a ser controlado (OGATA, 1998; CAMPOS; TEIXEIRA, 2007; GARCIA, 2007).

No entanto, o desenvolvimento de modelos teóricos rigorosos bem como a análise do desempenho, podem não ser práticos para processos complexos, se o modelo necessitar de um grande número de equações diferenciais com número significativo de parâmetros desconhecidos dentro de suas propriedades físicas e químicas. Outra alternativa é obter um modelo empírico diretamente a partir de dados experimentais, os quais são chamados modelos "caixa preta" (AGUIRRE, 2007; LJUNG, 1999). A técnica para obtenção de modelos a partir de dados coletados experimentalmente é chamada de identificação de sistemas.

2.6.1 Formas para identificação de sistemas

Segundo AGUIRRE (2007), métodos não paramétricos são aqueles que resultam em uma representação gráfica que caracteriza a dinâmica do sistema em estudo. Quando um modelo é apresentado em forma matemática, como por exemplo, equação diferencial ou função de transferência, este classifica-se como paramétrico. Exemplos típicos de modelos não paramétricos é a *resposta ao impulso* e a *resposta em frequência* (ZHU, 2001), sendo que a partir de uma dessas respostas é possível determinar modelos paramétricos com características semelhantes. O estudo dessa área é bastante extenso, sendo que maiores informações sobre ambas as técnicas podem ser encontradas em (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

Sabendo-se que uma forma de se analisar e reconhecer o comportamento de um sistema é excitá-lo com sinais apropriadamente escolhidos para analisar as curvas geradas por suas respostas, deve-se considerar que tais sinais estejam dentro dos principais pontos de trabalho reais. Os tipos de sinais para testes, comumente utilizados em identificação de sistemas, são as funções: impulso, degrau, rampa, senoidal, PRBS (*Pseudo-random binary signal*), ruído branco, dentre outros (AGUIRRE, 2007). A partir das respostas obtidas, podem-se extrair modelos aproximados, de baixa ordem, que descrevam o comportamento dinâmico do processo. Esses modelos são pouco precisos, mas podem ser suficientes para se obter o perfil comportamental do processo e efetuar uma pré-sintonia de controladores (P: proporcional, PI: proporcional integral ou PID: proporcional integral derivativo), reaplicá-los e entender com melhor precisão o comportamento do processo durante situações transitórias.

A entrada normalmente usada para identificar, de forma não-paramétrica, processos industriais é a excitação em degrau. Esses ensaios permitem gerar, graficamente, modelos empíricos dinâmicos representados por uma função de transferência com, no máximo, quatro parâmetros a serem determinados experimentalmente.

Segundo GARCIA (2007), existem cinco elementos tipicamente encontrados em processos industriais, cujas combinações podem representar esses processos de forma aproximada, sendo eles: ganho, elemento integrador, atraso de transporte, atraso de transferência e oscilador amortecido. Além desses, há dois elementos básicos que podem surgir ao se tentar identificar, através de resposta ao degrau, o comportamento de processos industriais, muito embora eles sejam menos usuais, sendo eles: elemento derivador e avanço de transferência. A Tabela 2 apresenta um quadro com a representação aproximada dos processos industriais, como uma combinação dos sete elementos básicos.

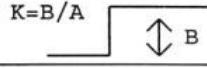
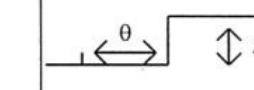
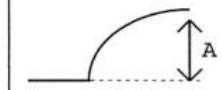
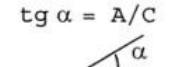
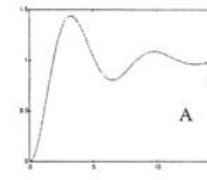
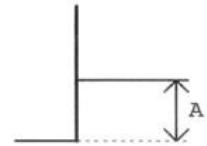
| Elemento de processo | Equação descritiva | Função de transferência | Resposta a degrau de amplitude A |
|-------------------------|--|--|---|
| GANHO | $y(t) = K \cdot u(t)$ | K | $K=B/A$  |
| ATRASO DE TRANSPORTE | $y(t) = 0, \quad t < \theta$ $y(t) = u(t - \theta), \quad t \geq \theta$ Para entrada em degrau: $y(t) = A \cdot H(t - \theta)$ (onde $H(t)$ =função degrau unitário) | $e^{-\theta \cdot s}$ |  |
| ATRASO DE TRANSFERÊNCIA | $\frac{dy}{dt} = \frac{u - y}{\tau}$ Para entrada em degrau: $y(t) = A \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \cdot H(t)$ | $\frac{1}{\tau \cdot s + 1}$ |  |
| INTEGRA-DOR | $\frac{dy}{dt} = \frac{u}{C}$ Para entrada em degrau: $y(t) = (A/C) \cdot t \cdot H(t)$ | $\frac{1}{C \cdot s}$ | $\tan \alpha = A/C$  |
| OSCILADOR AMORTECIDO | $\ddot{y}(t) + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot \dot{y}(t) + \omega_n^2 \cdot y(t) =$ $= \omega_n^2 \cdot u(t)$ Para entrada em degrau: $y(t) = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi \cdot \omega_n \cdot t} \sin \left(\omega_n \cdot \sqrt{(1-\xi^2)} \cdot t + \arccos(\xi) \right) \right] \cdot A$ | $\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$ |  |
| AVANÇO DE TRANSFERÊNCIA | $\frac{du}{dt} = \frac{y - u}{\tau}$ Para entrada em degrau: $y(t) = A \cdot [1 + \tau \cdot \delta(t)] \cdot H(t)$ (onde $\delta(t)$ =delta de Dirac) | $\tau \cdot s + 1$ |  |
| DERIVADOR | $y(t) = L \frac{du}{dt}$ Para entrada em degrau: $y(t) = L \cdot A \cdot \delta(t)$ | $L \cdot s$ |  |

Tabela 2 - Quadro com os elementos básicos de modelos aproximados de processos industriais.

2.6.1.1 Aproximação para sistemas de ordem 1

A aproximação de sistemas sobreamortecidos de ordem 2 ou superior por atraso de transferência τ mais atraso de transporte ou tempo morto θ , pode ser representada pela função de transferência de ordem 1 apresentada na equação (I) (GARCIA, 2007).

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{1 + \tau \cdot s} \quad (I)$$

Portanto, a identificação do sistema deste tipo resume-se basicamente na identificação do ganho K , o qual indica a relação entre as amplitudes dos sinais de entrada e saída do processo; a constante de tempo τ , que indica a velocidade em que a saída do sistema responde frente à aplicação de um degrau com amplitude conhecida em sua entrada e do parâmetro do atraso de transporte θ .

O atraso de transporte é incluído para considerar os elementos de ordem mais alta que são desprezados. Na Figura 8 mostra-se a curva de resposta temporal típica de processos sobreamortecidos de 2^a ordem ou superior (GARCIA, 2007).

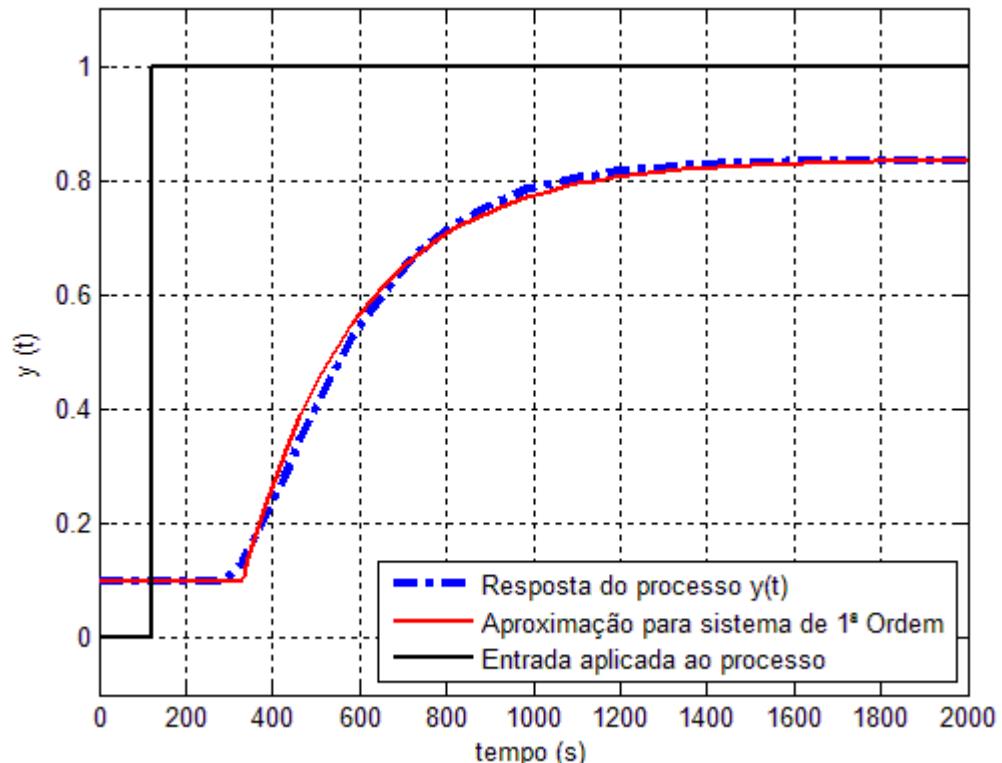


Figura 8 - Curva de resposta de processo sobreamortecido com atraso de transporte de ordem 2 ou superior submetido a degrau de amplitude A.

O valor do ganho K pode ser obtido dividindo-se a amplitude da variação da saída do processo pela amplitude A do degrau aplicado, como apresentado na equação (2).

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_\infty}{A} \quad (2)$$

Os parâmetros θ e τ do modelo representado por um sistema de 1^a ordem mais atraso de transporte podem ser determinados por diversos modos, entre eles: (i) Método da Tangente, (ii) Método de *MILLER*, (iii) Método de *SMITH* e (iv) Método de *SUNDARESAN & KRISHNASWAMY* (GARCIA, 2005; OGATA, 1998; CAMPOS; TEIXEIRA, 2007).

No Método da Tangente, originalmente proposto em ZIEGLER e NICHOLS (1942), deve-se traçar uma tangente através do ponto de inflexão da curva de resposta do processo. Essa tangente deve ser traçada desde o valor estacionário do processo antes de ocorrer a perturbação até o novo valor estacionário, conforme mostrado na Figura 9 (GARCIA, 2007).

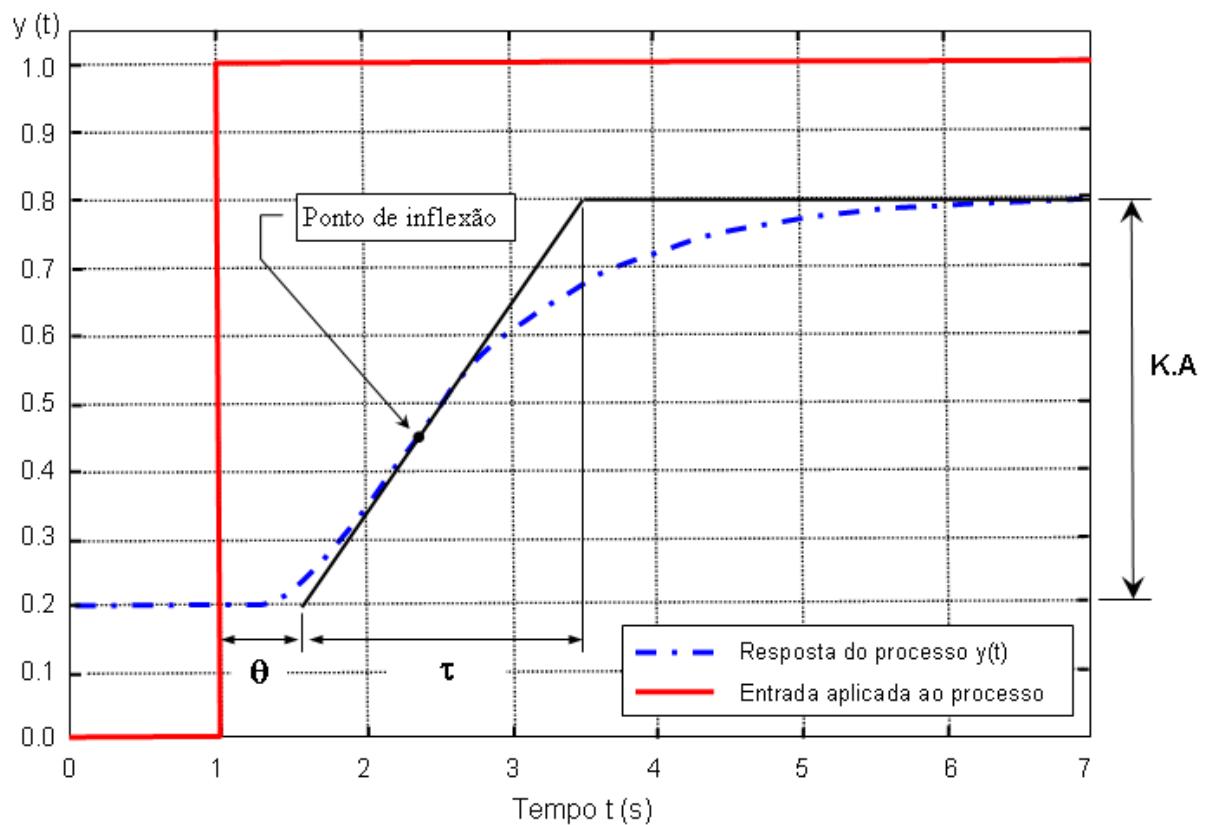


Figura 9 - Aplicação do método da tangente para determinação dos parâmetros θ e τ do modelo representado por um sistema de 1^a ordem mais atraso de transporte.

O atraso de transporte θ corresponde ao tempo entre o instante de aplicação do degrau até o ponto em que a tangente traçada encontra com o valor original do regime estacionário do processo antes da perturbação em degrau, conforme mostrado na Figura 9 (GARCIA, 2007).

O instante de tempo em que a tangente cruza com a linha que representa o valor estacionário da resposta após a aplicação do degrau representa o valor $\theta + \tau$. A constante de tempo τ corresponde ao intervalo de tempo entre os instantes em que a tangente traçada se encontra tanto com o valor original do regime estacionário do processo quanto com o novo valor do regime estacionário do mesmo.

No Método de *MILLER*, proposto em MILLER et al. (1967), o tempo em que a resposta do processo atinge 63,2 % de seu valor final corresponde a $\theta + \tau$. A determinação do valor de θ é feita de forma idêntica à do método da tangente. Sua aplicação pode ser vista na Figura 10.

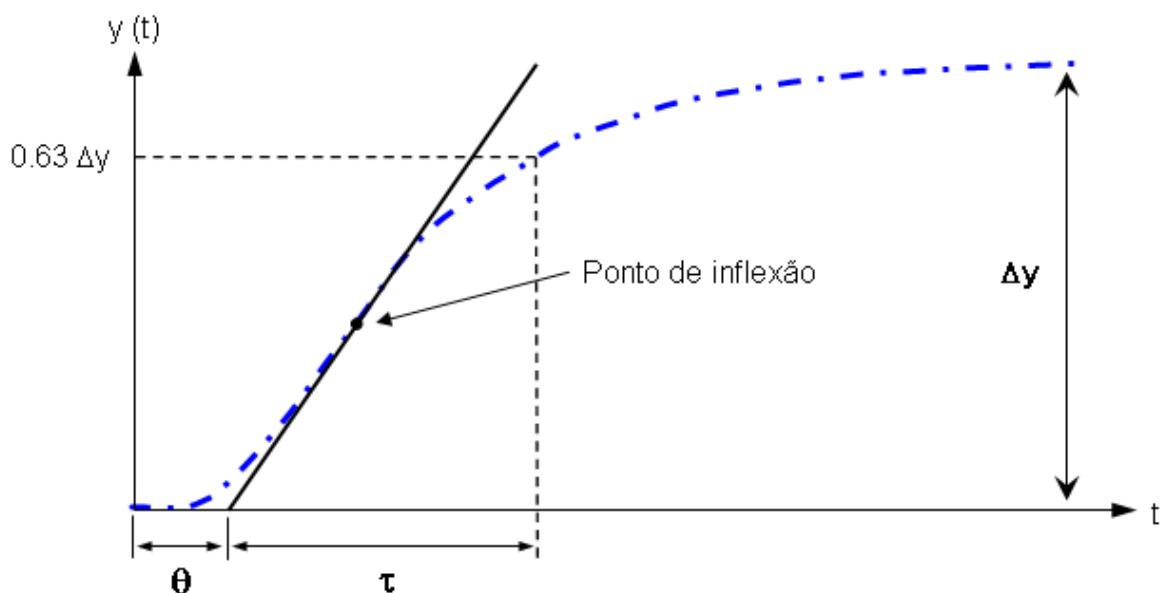


Figura 10 - Obtenção dos parâmetros θ e τ pelo método dos 63,2 % a partir de uma curva de resposta do processo.

Nos métodos citados, podem ocorrer dificuldades em se traçar a linha tangente com precisão prática. Uma alternativa proposta em SMITH (1972) é determinar θ e τ a partir de dois pontos na curva de resposta do processo. A solução analítica para a resposta ao degrau de amplitude A de um sistema de 1^a ordem + atraso de transporte é apresentada na equação (3) .

$$y(t) = A \cdot \left[1 - e^{-\frac{(t-\theta)}{\tau}} \right], \quad (t > 0) \quad (3)$$

Supondo que se calcule $y(t)$ em dois instantes de tempos quaisquer, por exemplo, $t = \theta + \frac{\tau}{3}$ e $t = \theta + \tau$, obtém-se as equações (4) e (5).

$$y\left(\theta + \frac{\tau}{3}\right) = 0,284 \cdot \Delta y \quad (4)$$

$$y(\theta + \tau) = 0,632 \cdot \Delta y \quad (5)$$

Os tempos em que a resposta atinge 28,4 % e 63,2 % de seu valor final podem ser obtidos a partir da curva de resposta do processo, como apresentado nas equações (6) e (7).

$$t_{0,284} = \theta + \frac{\tau}{3} \quad (6)$$

$$t_{0,632} = \theta + \tau \quad (7)$$

A solução desse sistema de duas equações fornece θ e τ , conforme as equações (8) e (9).

$$\tau = 1,5 \cdot (t_{0,632} - t_{0,284}) \quad (8)$$

$$\theta = 1,5 \cdot \left(t_{0,284} - \frac{t_{0,632}}{3} \right) = t_{0,632} - \tau \quad (9)$$

Um método similar ao anterior foi proposto em SUNDARESAN; KRISHNASWAMY (1978). Neste caso, propõem-se dois tempos, t_1 e t_2 e calcula-se θ e τ pelas equações (10) e (11).

$$\tau = 0,675 \cdot (t_2 - t_1) \quad (10)$$

$$\theta = 1,29 \cdot t_1 - 0,294 \cdot t_2 \quad (11)$$

onde t_1 e t_2 são estimados a partir da curva de resposta a uma entrada degrau e correspondem a 35,3 % e 85,3 % respectivamente aos valores da variação da resposta em regime estacionário.

2.6.1.2 Aproximação para sistema de ordem 2

No caso da resposta do processo a ser identificado possuir um comportamento semelhante ao da Figura 8, pode-se aproximá-lo, com alternativa à aproximação descrita em 2.6.1.1, por funções de transferência de segunda ordem do tipo da equação (12), ou na forma da equação (13) (AGUIRRE, 2007):

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} \quad (12)$$

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s} \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (13)$$

onde K é o ganho proporcional, θ é o tempo morto, τ_1 e τ_2 são as constantes de tempos fixas, ζ é o quociente de amortecimento e ω_n a frequência natural não amortecida do sistema.

Sendo o objetivo da identificação obter os parâmetros K (cuja método é mostrado em 2.6.1.1), θ , τ_1 , τ_2 ou ζ e ω_n , da respectiva função de transferência a partir de um degrau na entrada, pode-se utilizar o método de *SUNDARESAN* (DESHPANDE; ASH, 1981 apud AGUIRRE, 2007), baseado em processo computacional.

Para o método em questão, deve-se considerar degrau aplicado no instante 0 (zero), ganho $K=1$ e normalizar a curva do processo para valor em regime permanente unitário. Tal normalização é feita removendo-se da curva a ser identificada o valor inicial de y (valor da condição inicial) e dividindo-a pelo valor da amplitude máxima Δy . A Figura 11 mostra um exemplo de sistema sobreamortecido normalizado, e pronto para aplicação do método em questão (AGUIRRE, 2007). Na figura, t_m corresponde ao tempo onde ocorre a intersecção da reta tangente à $y(t)$ com seu valor em regime permanente, cujo valor é determinado segundo a expressão (19).

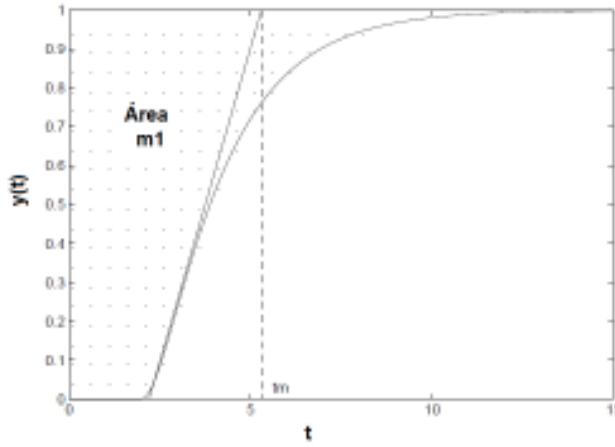


Figura 11 - Exemplo de sistema sobreamortecido normalizado em resposta ao degrau.

O método de *SUNDARESAN*, inicialmente, calcula a área m_1 hachurada da Figura 11, a qual é determinada pela expressão:

$$m_1 = \int_0^{\infty} [1 - y(t)] dt \quad (14)$$

A seguir determina-se M_i , que é a inclinação da tangente no ponto de inflexão de $y(t)$. A função de transferência $G(s)$ e a área m_1 são relacionadas segundo a expressão (15) e a resposta ao degrau da função $G(s)$ (equação (12)) é obtida pela expressão (16):

$$m_1 = -\left. \frac{dG(s)}{ds} \right|_{s=0} = \theta + \tau_1 + \tau_2 \quad (15)$$

$$y(t) = \left[1 - \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t-\theta}{\tau_1}} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t-\theta}{\tau_2}} \right] u(t - \theta) \quad (16)$$

O ponto de inflexão t_i pode ser calculado igualando-se a derivada de segunda ordem de (16) a zero, visto que $u(t-\theta)$ é um degrau unitário deslocado para o instante $t=\theta$ (tempo em que ocorre a transição deste sinal). A expressão de t_i é mostrada em (17), determinando-se então a inclinação da tangente M_i pela expressão (18), onde $\eta = \tau_1 / \tau_2$ e $\alpha = \tau_1 \tau_2 / (\tau_1 - \tau_2)$:

$$t_i = \theta + \alpha \ln \eta \quad (17)$$

$$M_i = \frac{\eta^{1/(1-\eta)}}{\alpha(\eta-1)} \quad (18)$$

A intersecção da reta tangente com o valor em regime permanente de $y(t)$ ocorre num ponto correspondente ao instante t_m dado por:

$$t_m = \theta + \alpha \left[\ln \eta + \frac{\eta^2 - 1}{\eta} \right] \quad (19)$$

Combinando-se as expressões (15), (18) e (19), obtém-se

$$M_i (t_m - m_1) = \frac{\eta^{1/(1-\eta)}}{\alpha(\eta-1)} \cdot \ln \eta \quad (20)$$

Note que se nesta equação η for substituído por $1/\eta$, a equação não se altera. Além disso ela pode ser escrita na seguinte forma, onde χ é uma variável auxiliar para manipulação da expressão:

$$\lambda = \chi e^{-\chi} \quad (21)$$

Sendo $\lambda = (t_m - m_1) \cdot M_i e$

$$\chi = \frac{\ln \eta}{\eta - 1} \quad (22)$$

O máximo valor de λ é e^{-1} e ocorre quando o sistema é criticamente amortecido ($\eta = 1$). O outro extremo é quando $\eta = 0$, neste caso o modelo se reduz a um de primeira ordem. Finalmente os parâmetros do modelo podem ser obtidos pela expressão (23):

$$\tau_1 = \frac{\eta^{\frac{1}{1-\eta}}}{M_i}; \quad \tau_2 = \frac{\eta^{\frac{1}{1-\eta}}}{M_i}; \quad \theta = m_1 - \tau_1 - \tau_2 \quad (23)$$

2.7 Filtragem de ruído em dados coletados experimentalmente

O desenvolvimento de novas tecnologias de aquisição de dados, unido ao avanço computacional, promoveu o surgimento de novas aplicações em muitos campos, tais como: astronomia, processamento de imagens, visão computacional, dentre outros. Entretanto, dados coletados geralmente possuem ruídos, quer seja devido aos processos de aquisição ou aos fenômenos naturais ocorridos durante o processo. Para que estes sejam corretamente analisados é necessário utilizar técnicas para remoção de ruídos (BÖMERS, 2000 apud PIFER et al., 2008). Tais técnicas exigem abordagens matemáticas robustas, visto que esses tipos de sinais, em sua grande maioria, são classificados como sinais não estacionários⁷. Uma das ferramentas que pode ser apropriadamente utilizada nessas situações é a Transformada *wavelet* (WT), também conhecida como transformada em *ondeletas* (BOLZAN, 2006), capaz de analisar séries temporais obtidas de qualquer sistema físico. A WT tem sido aplicada nas mais diversas áreas do conhecimento, como: estudos sobre turbulência atmosférica, processamento de sinais, sistemas hidrológicos, processamento de imagens, classificação de padrões, análise e compressão de sinais, quimiometria⁸, e, em particular, nos problemas de filtragens de sinais coletados experimentalmente (PINTO, 2009).

Para a abordagem da aplicação de interesse neste trabalho, que é a de filtrar dados coletados com ruídos utilizando a ferramenta *wavelet*, há necessidade de se apresentar alguns princípios matemáticos em contexto histórico para possibilitar uma melhor compreensão desta ferramenta. Logo, antes de iniciar a introdução à WT, é conveniente uma breve introdução sobre a decomposição de Fourier.

2.7.1 Análise de Fourier

A decomposição de funções é uma poderosa ferramenta de análise, síntese de sinais e aplicações com filtragem de sinais. A teoria mais representativa desse tipo de abordagem é a

⁷ Entenda-se como característica não-estacionária as séries temporais cujos momentos estatísticos (por exemplo variância e média) variam em qualquer segmento tomado desta série.

⁸ Quimiometria é a ciência relacionada a medidas realizadas em um sistema ou processo químico, obtendo informações sobre o estado do sistema através da aplicação de métodos matemáticos ou estatísticos, segundo a Sociedade Internacional de Quimiometria (International Chemometrics Society - ICS)

decomposição de Fourier (BRACEWELL, 1999), que tem como fundamento as funções harmônicas baseadas na variação da frequência (DIAS, 2003). Esta análise decompõe um sinal em componentes senoidais, formando um espectro de frequências, como ilustrado na Figura 12.

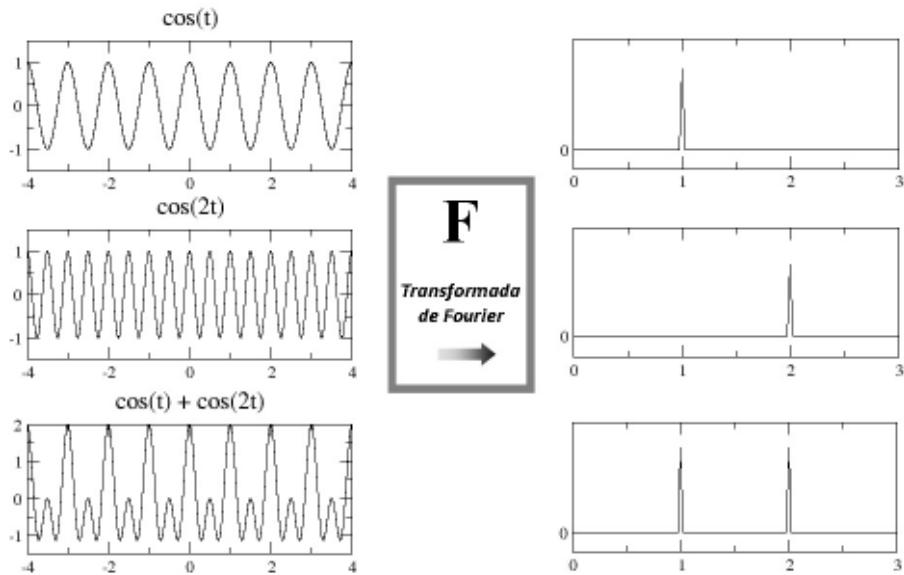


Figura 12 - Exemplo de decomposição de sinais por transformada de Fourier (WAVELET, 2011).

Segundo sua teoria, Fourier afirmou que qualquer função periódica $f(x)$ pode ser expressa por uma somatória de senos e cossenos na forma da expressão (24) (BOLZAN, 2006), ou em sua forma geral no domínio da frequência ω , apresentada na expressão (25).

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)] \quad (24)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (25)$$

No entanto, essa teoria não é a mais apropriada para o tratamento de sinais cuja resposta à excitação seja variante no tempo. A transformação espectral acarreta perda da informação temporal do sinal, bem como sua transformada inversa (BOLZAN, 2006; DIAS, 2003). No

caso particular do sinal estacionário, essa contrapartida não é muito relevante, entretanto, a maioria dos sinais de interesse possui características não estacionárias ou transitórias, como: desvios, tendências, mudanças bruscas, dentre outras. Como essas características são fundamentais na composição do sinal, nesses casos (não-estacionárias) a análise de Fourier não é adequada para detectá-las, visto que as suas funções de base têm um escopo global, estendendo-se ao longo de todo o domínio de análise original (temporal) (BOLZAN, 2006).

Devido a esta limitação, pesquisadores foram motivados a buscar conjuntos de funções de bases alternativas. As teorias desenvolvidas para caracterizar esses sinais propõem o uso de funções de base com escopo localizado em ambos os domínios, como a análise de Fourier em intervalos curtos de tempo STFA (*Short Time Fourier Analysis*), a análise por distribuições de Wigner Ville e a análise por *wavelets*, teorias que permitem a análise conjunta temporal-frequencial (DIAS, 2003).

2.7.2 Transformada *wavelet*

Em inúmeros casos a análise de um determinado sinal prioriza faixas específicas do espectro, dando menor importância para o restante do conteúdo frequencial. Para explorar melhor essa situação, é interessante uma transformação que flexibilize a largura da janela temporal, aplicando janelas mais estreitas às áreas espectrais desejadas, e aumentando a largura para o espectro de menor interesse. Uma técnica que permite essa abordagem diferenciada é a análise por transformada de *wavelets* (BOLZAN, 2006), sendo uma de suas características a de empregar o conceito de janelas deslizantes com regiões de tamanhos variáveis, utilizando longos intervalos de tempo quando se deseja maior precisão na informação com baixa frequência e o inverso caso as informações possuam alta frequência (MALANGE, 2010).

A WT decompõe uma função definida no domínio do tempo em outra função, definida no domínio do tempo e da frequência, ocorrendo em diferentes escalas e níveis de resolução com a utilização de uma função modelo (MALANGE, 2010). Esta transformada utiliza a *wavelet* que é uma forma de onda de duração limitada com valor médio nulo. Como comparação, pode-se utilizar uma senóide, que é a base de análise de Fourier. As senóides são ilimitadas no tempo, se estendem de $-\infty$ a $+\infty$, sendo ainda suaves e previsíveis. Já as

wavelets tendem a ser irregulares e assimétricas, constituindo análises que utilizam da decomposição de sinal em versões deslocadas e escalonadas da wavelet original (ou wavelet mãe). Ao observar a ilustração da Figura 13, a qual compara uma senóide com uma wavelet, deduz-se intuitivamente que sinais com mudanças abruptas são potencialmente melhor analisados com uma típica e irregular wavelet a uma suave senóide (DIAS, 2003).



Figura 13 - Exemplo de comparação entre uma senóide e uma wavelet.

O uso da WT para o tratamento analítico de um sinal pode ser feito por duas formas: pela transformada contínua CWT (*Continuous Wavelet Transform*) ou pela discreta DWT (*Discrete Wavelet Transform*), além de suas respectivas transformadas inversas. A transformada contínua traz consigo uma grande redundância de informações sobre o sinal analisado, o que a torna computacionalmente desinteressante (DIAS, 2003).

2.7.2.1 Transformada wavelet contínua

Uma das mais importantes aplicações da WT é a habilidade de processar e manipular dados em parâmetros compactados chamados de recursos ou características (*features*). Um sinal contém muitos dados e podem ser compactados em alguns parâmetros, chamados de coeficientes *wavelet* que caracterizam o comportamento do sinal (SANTOSO et al., 1996 apud MALANGE, 2010).

Tais coeficientes são resultados da expressão genérica da CWT mostrada na equação (26), a qual é definida como a soma sobre todo o domínio temporal do sinal multiplicado por versões escalonadas e deslocadas da função *wavelet* ψ , guardando semelhanças com o da análise de Fourier. Os parâmetros a e b correspondem aos fatores de escala e de deslocamento (DIAS, 2003; MALANGE, 2010).

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(a,b,t) dt \quad (26)$$

Os diversos coeficientes C resultantes da análise CWT, são função dos fatores da escala e da posição. Multiplicando-se cada coeficiente pela *wavelet* correspondente apropriadamente escalonada e deslocada, obtém-se as *wavelets* constituintes do sinal original, conforme ilustrado na Figura 14, produzindo uma visão tempo-escala de um sinal, como previamente citado.

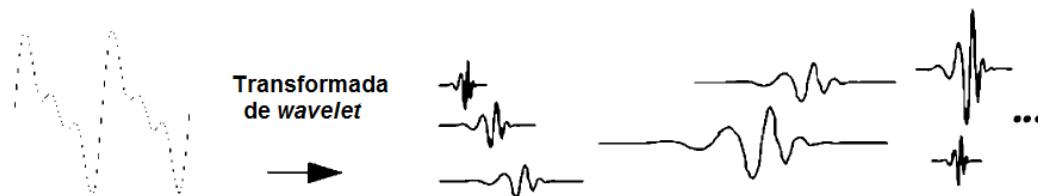


Figura 14 - Decomposição de um sinal em suas componentes *wavelets* constituintes por CWT (DIAS, 2003).

Calcular os coeficientes *wavelet* a cada escala possível é um processo muito longo e dispendioso computacionalmente, gerando uma grande quantidade de dados. Embora a CWT seja de grande interesse teórico, principalmente para a obtenção e a compreensão das propriedades matemáticas das funções *wavelets*, a sua discretização é necessária para aplicações práticas (HERNANDES; WEISS, 1996 apud MALANGE, 2010).

2.7.2.2 Transformada *wavelet* discreta

O conjunto de escalas nas quais a WT opera é contínuo, podendo operar em qualquer uma delas, desde a correspondente ao tamanho do sinal original até uma escala pequena o suficiente para ponderar variações dentro de um limite de resolução associado à medição do sinal original. Da mesma forma, é contínua em termos de posições (deslocamentos) durante o cálculo dos coeficientes, pois a *wavelet* analisadora é deslocada suavemente sobre todo o domínio temporal do sinal analisado, gerando em ambos os casos, quantidades muito grandes de dados a serem processados, como dito anteriormente.

Para tanto, uma estratégia eficiente e atraente, do ponto de vista computacional, seria a escolha de apenas um sub-conjunto de escalas e posições específicas para as quais os coeficientes devem ser calculados. Adotando-se essa estratégia genérica, a WT deixa de ser contínua para ser discreta (DIAS, 2003).

Para essa finalidade, um método de transformação discreta bastante utilizado e conhecido como *método de Mallat*, opera escalas e posições baseadas em potências de 2, são as chamadas *posições diáticas* (WAVELET, 2011; MALLAT, 1988 apud DIAS, 2003; TIWARI; SHUKLA, 2002 apud MALANGE, 2010), utilizando ainda de um banco de filtros, conceito este oriundo da teoria geral de processamento de sinais. Essa base conceitual do método de *Mallat* perdura até os dias de hoje como sinônimo de transformada *wavelet* discreta (DWT), embora existam outros algoritmos.

Dois termos citados em literaturas que tratam análise por *wavelet* são *aproximações* e *detalhes*. O termo *aproximação* é referente aos componentes de baixa frequência do sinal, podendo dizer que é a parte mais importante, sendo estes termos os que dão a identidade do sinal. O termo *detalhe* refere-se aos componentes de altas frequências, que também possuem sua parcela de importância, por exemplo: considerando a voz humana, reduzindo-se os conteúdos de alta frequência, a voz soa diferente, mas o discurso continua a ser perceptível, no entanto, se for removido o conteúdo de baixa frequência, o discurso deixa de ser perceptível (MALLAT, 1998 apud DIAS, 2003).

Para um processo com nível básico dentro de uma análise DWT, a divisão mencionada pode ser entendida através da ilustração apresentada na Figura 15, onde o sinal original *S* é decomposto por dois filtros complementares, sendo que o filtro passa-baixas gera a componente de *aproximações A* e o filtro passa-altas a componente de *detalhes D* (MALANGE, 2010; DIAS, 2003).

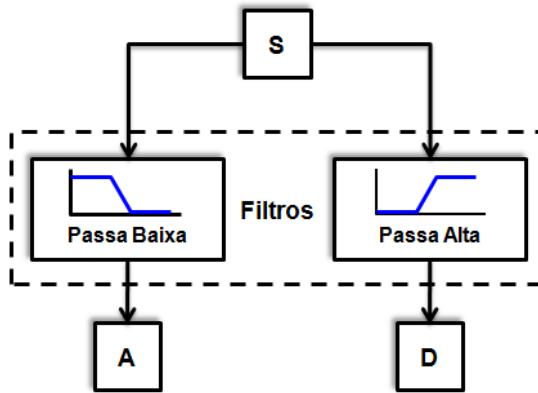


Figura 15 - Processo de filtragem de um sinal S , com resultado nas parcelas A e D (MALANGE, 2010).

Pela Figura 15 é possível concluir que a utilização deste método em um sinal real gera o dobro de dados em relação aos sinais iniciais, pois é dividido em dois resultados A e D . Para melhoria deste problema, deve-se introduzir um operador para diminuir o número de amostras, como ilustrado na Figura 16, o qual é denominado *downsampling* (decimação), sendo sua função a de fornecer aos filtros os dados de forma alternada segundo as amostragens, por exemplo, nas amostragens pares são processados os dados em D (filtro passa altas) e nas ímpares os dados em A (filtro passa baixas) (BURRUS, 1998 apud DIAS, 2003).

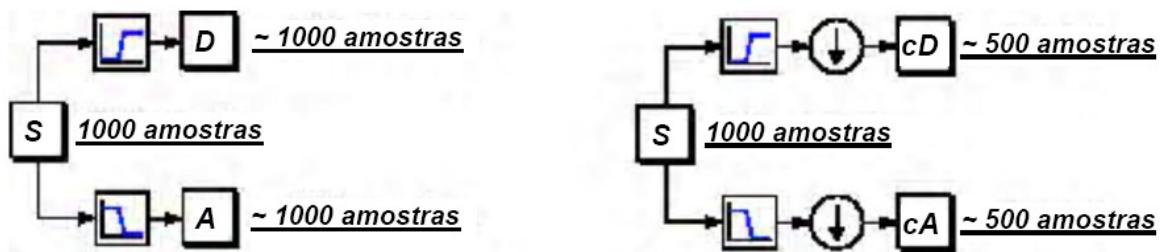


Figura 16 - Processo para decomposição por filtragem sem e com *downsampling* (MALANGE, 2010).

Portanto, em linhas gerais, o processo de decomposição por DWT pode ser entendido com o seguinte exemplo: seja um sinal senoidal puro com ruído adicionado (S), a DWT deste sinal produz as componentes cD (detalhes) e cA (aproximações), conforme ilustração da Figura 17. Observa-se que os coeficientes da componente cD são pequenos e consistem

essencialmente de ruído, enquanto que os coeficientes da componente aproximações cA contém muito menos ruído que o sinal original. O processo de decomposição da DWT pode ser repetido, sempre atuando sobre as componentes de aproximações. Sucessivas decomposições geram a chamada *árvore de decomposição wavelet*. O limite máximo de decomposições corresponde ao nível em que a componente de detalhes consista de apenas uma amostra. O limite prático entretanto costuma ser selecionado com base na natureza do sinal, ou em um critério mais específico tal como o da entropia (MISITI et al., 1997 apud DIAS, 2003).

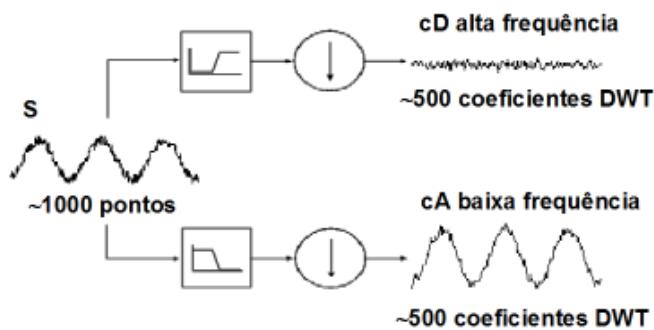


Figura 17 - DWT para um sinal senoidal com ruído (DIAS, 2003).

2.7.3 Remoção de ruídos utilizando transformada *wavelet*

O fato da WT possibilitar a decomposição de um sinal em várias componentes, cada uma com frequência própria, resulta como uma excelente ferramenta de filtragem. Para tal, ao longo dos anos, foram criadas famílias (funções) de *wavelets* para as mais diversas aplicações de filtragens, sendo as mais conhecidas (BÖMERS, 2000 apud PIFER et al., 2008; MALANGE, 2010):

- **Haar:** esta *wavelet* é a primeira e a mais simples. Possui apenas dois coeficientes de filtros e deste modo uma faixa de transição longa é garantida. É representada por uma onda quadrada (Figura 18), onde sinais “suaves” não são bem reconstruídos. Com relação ao esforço computacional, ela é ideal para processamento em tempo real.

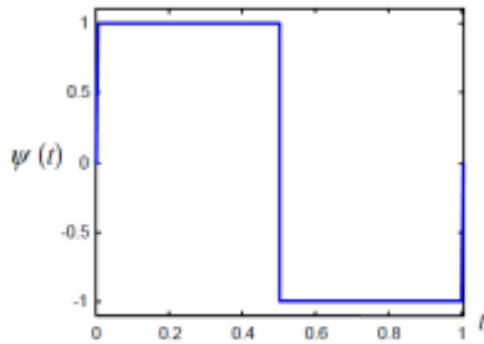


Figura 18 - Função *wavelet* de *Haar*.

- ***Coifled ou Daubechies***: Ingrid Daubechies, construiu uma família que é chamada de “wavelets ortonormais suportadas compactamente”, diferente de todos os exemplos de bases *wavelets* ortonormais (com exceção da base de *Haar*) que consistem de funções de suporte infinito, como mostrado na Figura 19. Dessa forma torna a análise *wavelet* discreta possível, pois pode ser definida em um intervalo limitado, sendo que para isso basta que um número finito de coeficientes de filtro seja diferente de zero.

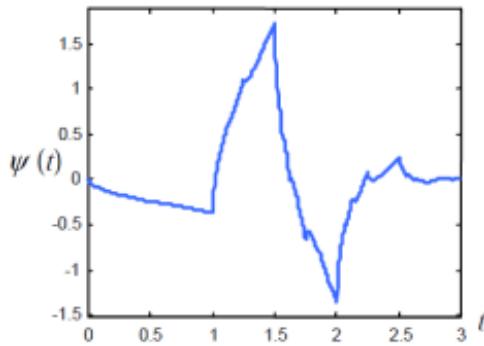


Figura 19 - Função *wavelet* de *Daubechies*.

- ***Symlets***: são *wavelets* quase simétricas, propostas por Daubechies como uma modificação à família *db* (*daubechies*). As propriedades das duas famílias *wavelets* são similares (DAUBECHIES, 1992 apud MALANGE, 2010).
- ***Morlet***: Função pertencente à família das *wavelets* não-ortogonais. A *wavelet* de *Morlet* não possui função escala e é explicitada por uma função Gaussiana

modulada (*shifted*), levemente ajustada (MORLET, 1984 apud MALANGE, 2010). A Figura 20 ilustra tal função.

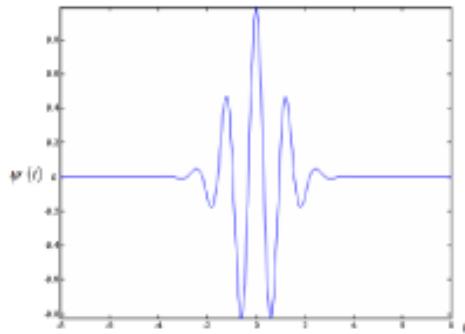


Figura 20 - Função *wavelet* de *Morlet*.

- **Chapéu Mexicano (*Mexican hat*)**: esta *wavelet* não tem função escala e é derivada de uma função que é proporcional à segunda derivada da função densidade de probabilidade Gaussiana (MALLAT, 1998 apud MALANGE, 2010). A Figura 21 ilustra esta função.

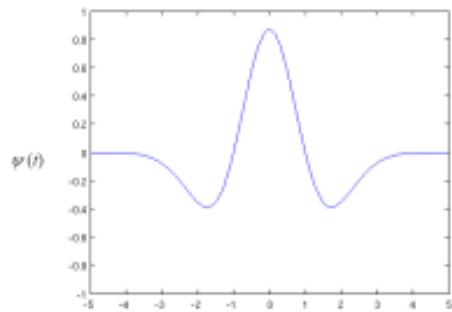


Figura 21 - Função *wavelet chapéu mexicano*.

- **Meyer**: a primeira *wavelet* trivial diferente da *wavelet de Haar* continuamente diferenciável, ou seja, uma base *wavelet* suave ortonormal. A *wavelet de Meyer* é mostrada na Figura 22 a seguir (MEYER, 1993 apud MALANGE, 2010).

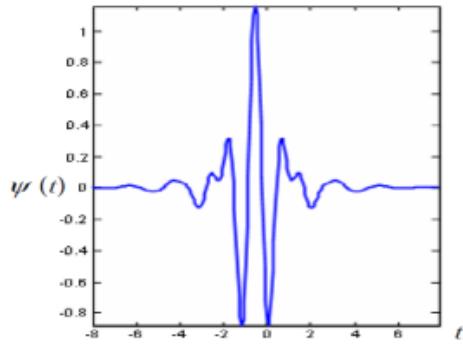


Figura 22 - Função *wavelet* de Meyer.

- ***Biorthogonal:*** esta família apresenta propriedade de fase linear, o que é importante na reconstrução de sinais e imagens. Usa duas *wavelets*, uma para decomposição e uma outra para a reconstrução, em vez de uma única *wavelet*. É uma função onde a transformada *wavelet* é inversível, mas não necessariamente ortogonal. Com isso, possibilita um grau de liberdade adicional: a construção de funções *wavelet* simétricas (MALLAT, 1998 apud MALANGE, 2010).

A efetivação da filtragem de sinais para remoção de ruídos, utilizando a DWT, pode ser compreendida em três etapas principais (FODOR, 1998 apud PIFER et al., 2008):

- (i) analisar o sinal (decomposição) realizando a transformada *wavelet* através de bancos de filtros e decimadores;
- (ii) selecionar o tipo do *threshold*⁹ (limiar) apropriado para cada nível de decomposição;
- (iii) realizar a síntese do sinal, através de bancos de filtros que possuem a função inversa *wavelet* e de interpoladores.

Nas etapas (i) e (iii) definem-se o tipo de *wavelet* e o nível de decomposição a serem utilizados, parâmetros esses determinados empiricamente, de acordo com os sinais gerados após a aplicação desses. Na etapa (ii) é preciso cautela na escolha de um tipo ou nível de limiar. Valores inadequados podem resultar numa significativa perda do sinal original. Os tipos de limiares mais comuns são (FODOR, 1998 apud PIFER et al., 2008):

⁹ Neste tipo de estudo, o termo *threshold* significa o ponto limite para que a função de filtragem ocorra, ou seja, o limiar que define o que deve ser utilizado e o que deve ser filtrado.

- **soft:** dado um nível limiar, os valores do sinal abaixo deste nível serão anulados (zerados) e os valores acima deste sofrerão uma redução igual ao valor determinado pelo limiar. A expressão do sinal resultante, $\delta_\lambda^s(w)$, é dada a seguir:

$$\delta_\lambda^s(w) = \text{sgm}(w)(|w| - \lambda)I_{\{|w| > \lambda\}} \quad (27)$$

- **hard:** dado um nível limiar, os valores do sinal menores que este limiar serão anulados (zerados) e os valores acima serão preservados, resultando no sinal $\delta_\lambda^h(w)$:

$$\delta_\lambda^h(w) = wI_{\{|w| > \lambda\}} \quad (28)$$

Nas expressões anteriores, w é a energia do sinal, λ é o nível de limiar (*threshold*), $\text{sgm}(w)$ é a função sigmóide (HAYKIN, 1999) e $I_{\{|w| > \lambda\}}$ é a função indicadora, a qual assume um (1) se o valor absoluto da energia w for maior que o limiar, ou zero (0) nas demais condições.

A estimativa do ruído utilizando fórmulas para determinar o limiar adequado é complexo e trabalhoso. Por ser este um parâmetro essencial, pois o que se deseja eliminar é somente a energia do ruído e não do sinal em estudo, e considerando que o método analítico pode resultar em erros de dimensionamento, é comum determiná-lo de forma empírica. De maneira a facilitar a aplicação e uso de *wavelets*, pacotes computacionais estão disponíveis. Dentre estes pode-se citar o *toolbox* para uso do *wavelet* do MATLAB® (WAVELET, 2011).

3 MATERIAIS UTILIZADOS E INSTRUMENTAÇÃO PROPOSTA

Como dito anteriormente, para o estudo da identificação de modelos experimentais da etapa enxágue de um processo CIP, conforme proposto nos objetivos deste trabalho, utiliza-se como protótipo de planta industrial o trocador de calor do tipo feixe tubular existente na instalação piloto do bloco I do CEUN-IMT.

Como produto de processamento nos tubos internos do trocador de calor ou simplesmente fluído de processo, escolheu-se o leite. Além de abundância no mercado e facilidade de acesso, possui complexa composição química, como citado em 2.3, e seu beneficiamento é alvo de importante cuidado com a higienização e limpeza dos equipamentos envolvidos.

O experimento é automatizado utilizando-se um computador PC integrado a uma placa eletrônica para aquisição e geração de sinais analógicos e digitais. A aquisição de dados e controle do processo é realizada através de *software* de alto desempenho com interface amigável com o usuário, desenvolvido em ambiente LabVIEW®, na linguagem de programação gráfica denominada “G” (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010)

O LabVIEW® teve sua primeira versão disponibilizada em 1986 para máquinas Macintosh e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os Sistemas Operacionais Windows®, Linux e Solaris®. Os principais campos de aplicação do LabVIEW® são a realização funcional de medições, automação e controle. A programação é feita utilizando-se blocos funcionais de forma a modelar o fluxo de dados utilizado, o que oferece vantagens tanto na aquisição de dados quanto na sua manipulação. Dentre os blocos disponibilizados, existem diversos algoritmos encapsulados, como, por exemplo, identificação de sistemas, controladores, coleta e gravação de dados, os quais facilitam o desenvolvimento de aplicações.

Os componentes dos programas escritos na linguagem do LabVIEW® são chamados de instrumentos virtuais (VIs). Os VIs são compostos por um painel frontal, que contém a interface do usuário, e por um diagrama de blocos, que contém o código do programa em linguagem gráfica. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado, fornecendo um bom desempenho do ponto de vista do tempo de resposta, permitindo aplicações em tempo real.

3.1 Trocador de calor e planta utilizada

A Figura 23 mostra o ambiente de estudo usado neste trabalho. O trocador de calor (P1) é de fabricação Vettore–Manghi, modelo 1978 (VETTORI-MANGHI, sd). Seu funcionamento consiste na circulação do produto ou fluído de processo em estado líquido, cuja alimentação é feita por intermédio do reservatório de entrada (P5), sendo direcionado aos tubos internos, com detalhes mostrados na Figura 24, feito em 4 passagens, conforme esquematizado na Figura 25. Nos tubos, o fluído de processo passa inicialmente pela seção 1, sai desta seção e entra na seção 2 e assim sucessivamente pelas seções 3 e 4. Através de válvulas manuais, manobra-se o fluxo do fluído de processo da saída do tubo do trocador de calor para o reservatório de entrada ou para duas saídas de descarte, conforme ilustração da Figura 26, onde a válvula (V1) permite interromper a passagem do fluído de processo para o reservatório de entrada e a válvula (V2) possui quatro posições: fluxo simultaneamente nas duas saídas de descarte (D1 e D2), em apenas uma delas (exclusivamente D1 ou D2) ou interrupção nas duas.

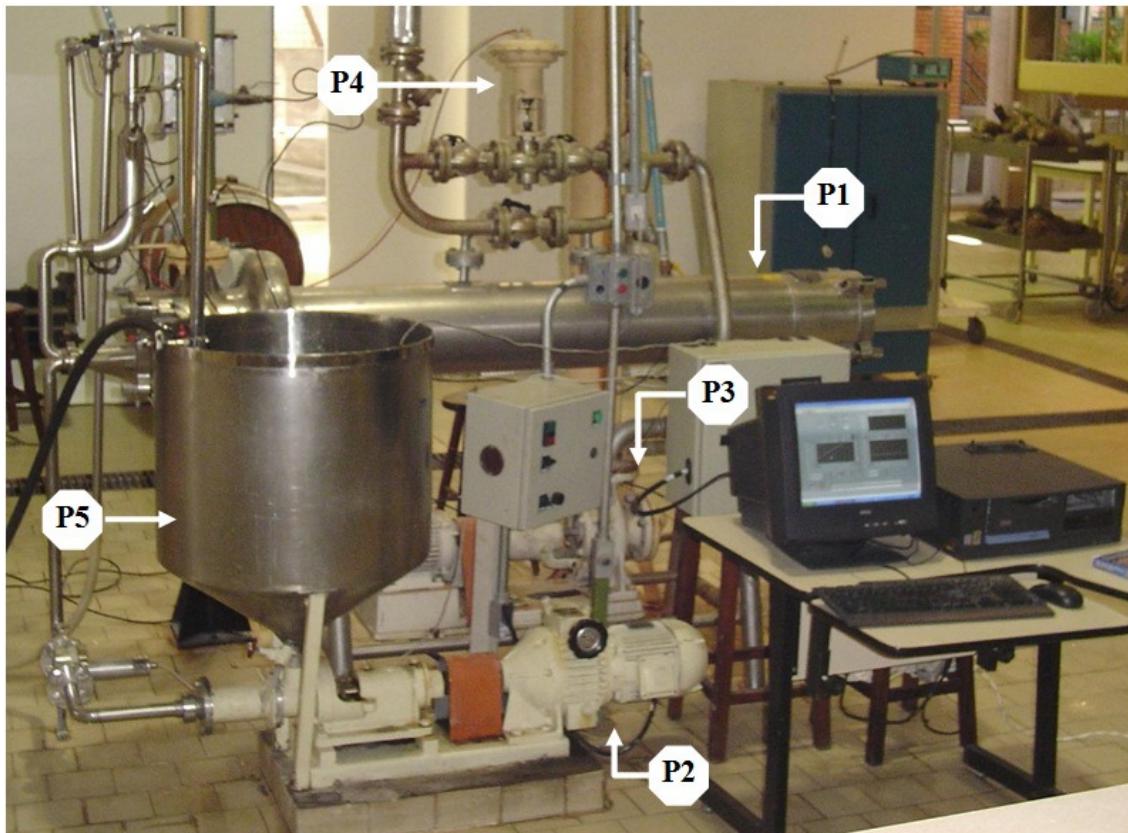


Figura 23 - Planta com trocador de calor tipo feixe tubular instrumentado.

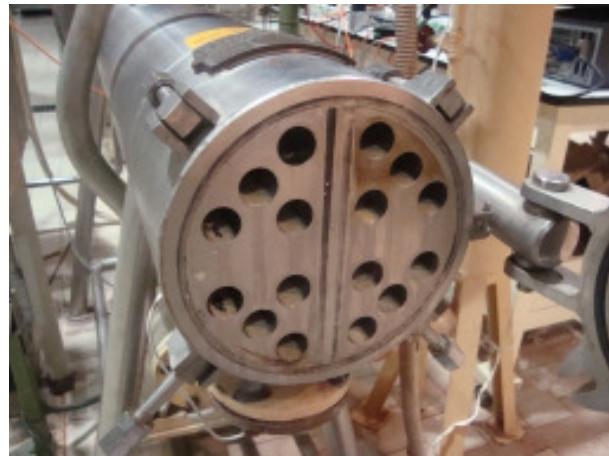


Figura 24 - Tubos internos do trocador de calor para o fluído de processo.

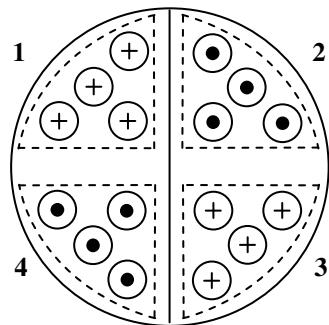


Figura 25 - Sequência das 4 seções de passagem do fluído de processo nos tubos do trocador de calor.

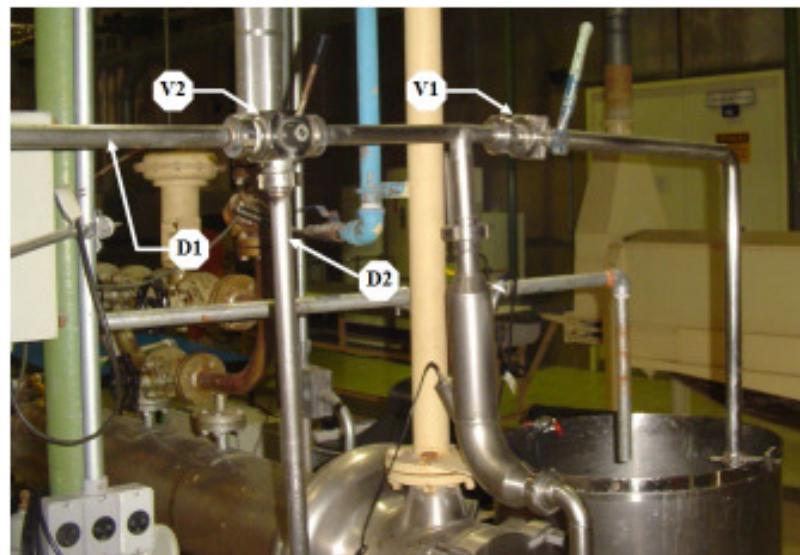


Figura 26 - Válvulas para manobra da saída do fluído de processo ao reservatório de entrada ou descarte.

O deslocamento do fluído de processo nos tubos internos do trocador de calor é promovido por uma bomba centrífuga de deslocamento positivo (P2) mostrada na Figura 23, de fabricação Robuschi, modelo RE50-110 (ROBUSCHI, 2010), cujo funcionamento baseia-se em um rotor de aço na forma de um helicoidal comum e de secção circular. O rotor gira dentro de um estator, geralmente fabricado em elastômero vulcanizado numa carcaça externa metálica e na forma de uma cavidade helicoidal dupla com o dobro do passo do rotor, conforme ilustrado na Figura 27 (WEATHEFORD, 2010). Na figura, Dr é o diâmetro do rotor, Er sua excentricidade, Pr é o passo do rotor e Q é a vazão da bomba. A rotação da bomba (P2) é controlada por meio de um inversor de frequência, fabricação ABB, modelo ACS143-2K7-1 (ABB, 2010).

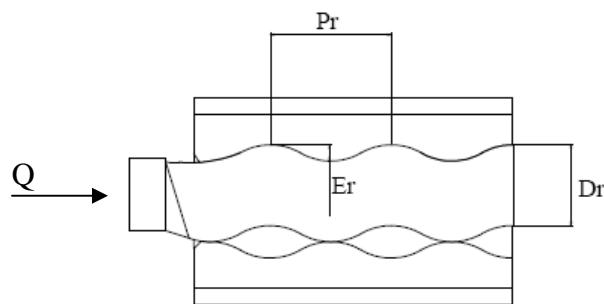


Figura 27 - Rotor helicoidal de bomba centrífuga.

O aquecimento do trocador de calor, cuja temperatura é controlada através da injeção de vapor saturado, é realizado com água quente que circula por sua carcaça. A água de aquecimento é impulsionada pela bomba centrífuga (P3) mostrada na Figura 23, fabricação Robush, modelo RE50-160 (ROBUSCHI, 2010), com acionamento tipo liga/desliga (*on/off*).

A geração de vapor para aquecimento da água é feita por uma caldeira tipo flamo tubular (BREMER, 2010), ou caldeira de tubo de fogo, instalado em ambiente próprio e adequado. Neste tipo de equipamento, os gases provenientes da combustão do combustível, no caso querosene, atravessam a caldeira no interior de tubos que se encontram circundados por água, cedendo calor à mesma, onde os gases gerados pela combustão sobem através dos tubos, aquecendo e vaporizando a água que está em torno deles (BREMER, 2010).

A variação da temperatura do fluído de processo dá-se em decorrência da variação da quantidade de vapor aplicada ao sistema integrado de aquecimento do trocador de calor, cujo

ajuste é feito pela válvula de controle eletropneumática (P4), de fabricação Fluxotrol, modelo PK2117, tipo ação inversa (FLUXOTROL, 2010).

O processo de aquecimento ocorre com a abertura da válvula eletropneumática, a qual injeta vapor de água saturado a $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ na água em estado líquido proveniente de um reservatório cilíndrico vertical, que desempenha o papel de um sistema de acúmulo de energia. A água quente resultante de tal mistura é conduzida à entrada do casco do trocador de calor, fornecendo energia térmica ao sistema e acarretando no aumento de temperatura. Estando o casco do trocador de calor submetido à elevação de temperatura, o mesmo irá aquecer o fluido de processo existente no interior dos tubos, tendendo a manter o equilíbrio térmico entre o corpo e a tubulação interna do trocador de calor. A água de saída do casco retorna ao reservatório vertical, o qual possui uma válvula de purga que é acionada na condição de sua pressão interna ultrapassar o limite superior.

Para o resfriamento do produto, o procedimento é inverso, ou seja, pelo fechamento da passagem de vapor de aquecimento na válvula de controle. Neste processo, o tempo de resposta é mais lento quando comparado ao de aquecimento, pois o resfriamento ocorrerá apenas em decorrência da troca térmica entre o corpo do trocador de calor, o fluido de processo e o meio ambiente. Logo, o controle automático de temperatura necessita considerar tal característica em seu algoritmo, acarretando maior dificuldade na elaboração do processo de controle. Os detalhes dos principais componentes externos do trocador de calor já descritos são ilustrados da Figura 28 à Figura 30.



Figura 28 - Bomba de deslocamento para fluido de processo.



Figura 29 - Bomba centrífuga para circulação de água quente.



Figura 30 - Válvula eletropneumática de controle do vapor de aquecimento.

3.2 Instrumentação do processo

Como parte do objetivo deste trabalho é a automação do processo via algoritmos de controles computacionais, foi necessário elaborar sua instrumentação, escolhendo-se os sensores utilizados, suas localizações e condicionamentos dos sinais envolvidos.

Em virtude de se utilizar um trocador de calor, fica evidente a importância de medirem-se temperaturas em pontos estratégicos. A Figura 31 ilustra os posicionamentos dos elementos de medições, no trocador de calor, para aquisições dos valores das quatro temperaturas envolvidas no mesmo.

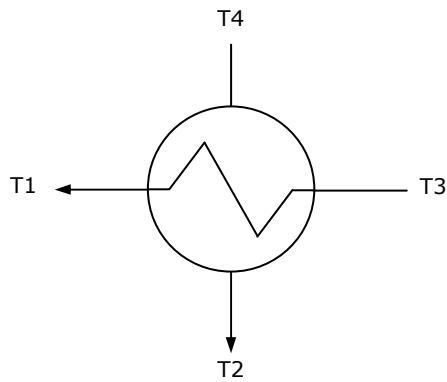


Figura 31 - Legenda das temperaturas medidas no trocador de calor: T3 e T1 fluído de processo, T4 e T2 água de aquecimento.

A temperatura da saída do fluido de processo (T1) é um parâmetro essencial a ser medido, pois é utilizada em várias etapas necessárias para a obtenção de modelos e na implementação de controladores aplicados neste trabalho, como pode ser verificado no capítulo 4. As temperaturas da água de aquecimento (T4 e T2) são utilizadas para monitorar o limite máximo de temperatura nominal, na faixa de 100°C, propiciando que se feche a válvula de vapor caso este valor seja ultrapassado. Pela facilidade de aquisição proporcionada pela automação desenvolvida, a temperatura da entrada do fluido de processo (T3) é simplesmente armazenada, não sendo diretamente necessária neste trabalho, mas disponibilizada a trabalhos futuros, como por exemplo, para efetuar o cálculo da energia empregada no aquecimento.

Outra variável importante é a vazão do fluido de processo. O controle de escoamento deste líquido influencia na modelagem das várias etapas de um processo CIP. Para tanto, utilizou-se um medidor de vazão acoplado à saída da bomba do fluido de processo. Este ponto de instalação foi escolhido por possuir a menor turbulência do circuito e menor temperatura do fluido de processo, contribuindo para menor desgaste do equipamento.

A medida do pH do fluido de processo é fundamental para a obtenção dos modelos experimentais utilizados neste trabalho. Deseja-se medir o pH da saída do fluido de processo, de maneira a estudar, como citado anteriormente, as dinâmicas a seguir:

- (i) alcalinidade da água de enxágue em função da vazão de operação da mesma;
- (ii) alcalinidade da água de enxágue em função de sua temperatura de operação.

3.2.1 Equipamentos da instrumentação

Basicamente utilizaram-se para desenvolvimento deste trabalho, em conjunto com a planta descrita no item 3.1, os instrumentos e materiais que serão descritos neste item. A Figura 32 fornece o diagrama geral da instrumentação proposta, onde as notações dos equipamentos correspondem à seguinte legenda:

- TT1 e TT3: sensores e transmissores para as temperaturas de saída e de entrada do fluído de processo, respectivamente;
- TT2 e TT4: sensores e transmissores para as temperaturas de saída e de entrada da água quente de aquecimento, respectivamente;
- FT: sensor e transmissor da vazão do fluído de processo;
- SC: controle da velocidade do fluído de processo;
- AE: sensor e transmissor de pH do fluído de processo;
- ET: conversor de sinal elétrico para compatibilizar o sinal proveniente do computador de processo ao controle da válvula eletropneumática;
- Bomba 1: bomba para o fluído de processo;
- Bomba 2: bomba para o líquido de aquecimento.

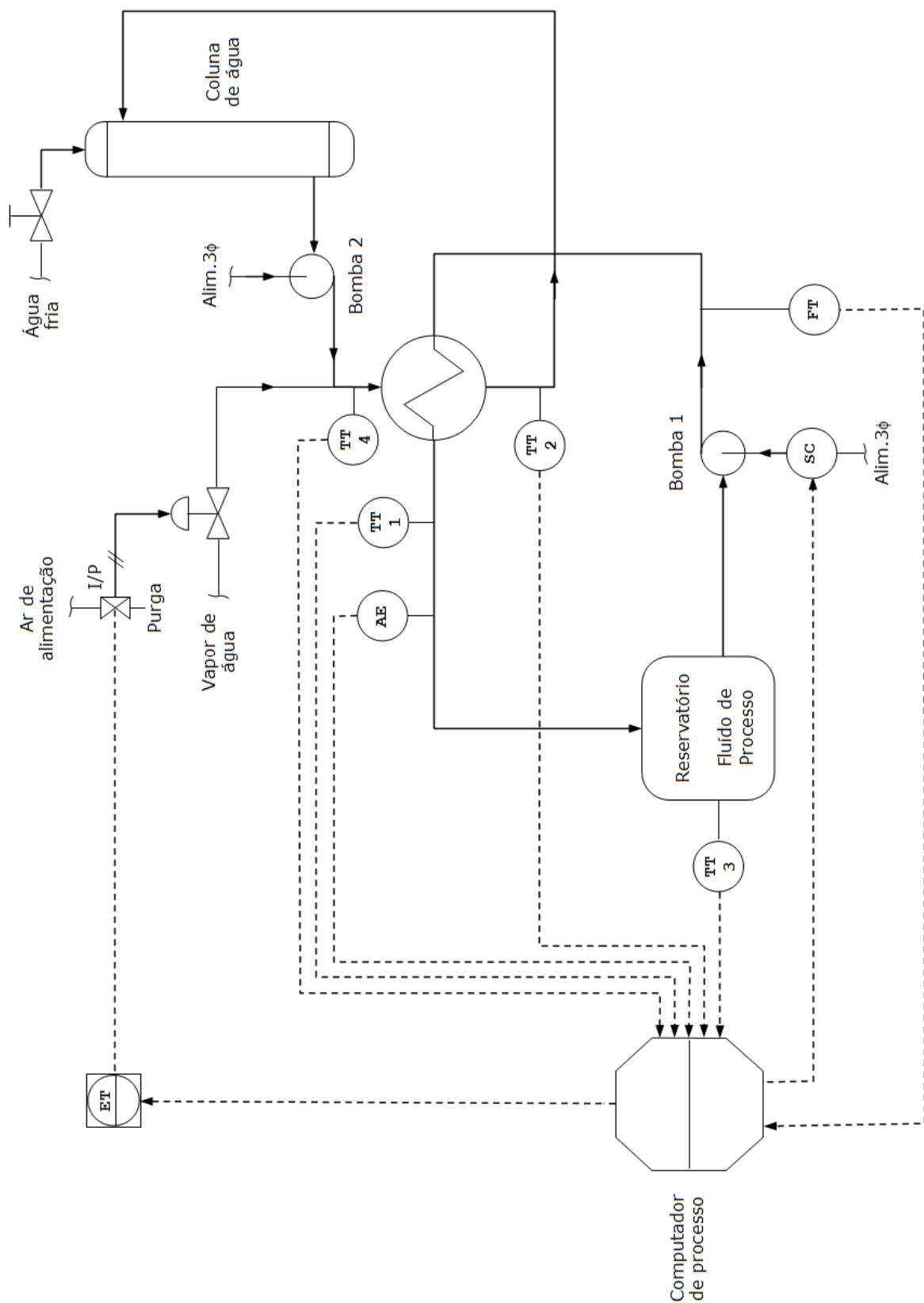


Figura 32 - Diagrama geral do processo e da instrumentação.

A plataforma responsável pela aquisição de dados e controle da vazão e temperatura da planta em estudo é definida como SECD (Sistema Eletrônico de Coleta de Dados), funcionando como um computador de processo, sendo composta basicamente por interfaces e um sistema computacional que, além do controle, proporciona a aquisição e armazenamento dos dados de interesse. É composta pelos itens:

- um microcomputador do tipo PC usado para a coleta e armazenamento dos dados de interesse do processo, com base de execução em ambiente LabVIEW®;
- aplicativo LabVIEW® versão 2009 para executar o monitoramento, aquisição de dados e controle do processo em tempo real, segundo ambiente de *software* desenvolvido neste trabalho;
- uma placa de aquisição de dados NATIONAL INSTRUMENTS®, modelo NI PCI-6259, 4 canais analógicos de saída e 32 canais analógicos de entrada ambos com faixa de operação de -10 V a +10 V e resolução de 16 bits, além de 48 canais digitais tipo entrada/saída programáveis;
- um conjunto de cabos blindados para placa de aquisição modelo SHC68-68-EPM, fabricante NATIONAL INSTRUMENTS®;
- uma placa de conexões CB-68LP, fabricante NATIONAL INSTRUMENTS®;
- quatro condicionadores de sinais para compatibilizar os sinais provenientes dos elementos sensores de temperatura à placa de aquisição de dados;
- um conversor para compatibilizar o sinal de controle da válvula eletropneumática, proveniente da placa de aquisição de dados.

O desenvolvimento dos aplicativos computacionais em plataforma LabVIEW® foi realizado em caráter dedicado à cada fase de desenvolvimento do trabalho, e serão apresentadas ao longo dos capítulos 4 e 5.

A Figura 33 apresenta uma ilustração da placa de aquisição de dados utilizada e a Figura 34 ilustra a placa de conectores para acoplagem das entradas e saídas da placa de aquisição de dados com o meio externo.



Figura 33 - Placa de aquisição de dados da NATIONAL INSTRUMENTS®.



Figura 34 - Placa de conexões da NATIONAL INSTRUMENTS®.

Os acoplamentos dos sinais externos para o computador PC (computador de processo) foram feitos basicamente pelas seguintes conexões:

- quatro entradas analógicas da placa de aquisição de dados, com faixa de 0 a 10 V, para medição das temperaturas T1 a T4;
- uma entrada analógica da placa de aquisição de dados, com faixa de 0 a 10 V, para medição da vazão do fluído de processo;
- uma saída analógica da placa de aquisição de dados, com faixa de operação 0 a 10 V, para controle da vazão do fluído de processo;

- uma saída analógica da placa de aquisição de dados, com faixa de operação 0 a 10 V, para controle da válvula eletropneumática de passagem de vapor;
- uma porta serial do computador PC para medida do pH operando em 9600 bps.

O esquema elétrico geral das ligações dos dispositivos periféricos, os quais serão descritos nos itens seguintes, à placa de conexões é apresentado no **APÊNDICE A**.

3.2.1.1 Elementos sensores

Para efetuar as medições das quatro temperaturas envolvidas no processo, utilizaram-se elementos sensores de temperatura do tipo termoresistor PT 100Ω, para faixa de 20°C a 130°C, fabricação TECNISIS, modelo Multp IOPE 49312 (TECNISIS, 2010). Tais sensores atendem plenamente às temperaturas envolvidas no processo, que ocorrem na faixa de 40°C a 90°C. Optou-se utilizar estes sensores por possuírem comportamento linear na faixa de operação utilizada, alta repetibilidade de leituras, não reagirem com os agentes utilizados no processo, apresentarem robustez mecânica, serem comumente utilizados em processos industriais e possuírem baixo custo. O posicionamento dos sensores das temperaturas do fluído de processo é ilustrado na Figura 35 e das temperaturas da água de aquecimento na Figura 36.



Figura 35 - Posicionamento dos elementos de medição de temperatura da entrada (T3) e saída (T1) do fluído de processo.



Figura 36 - Posicionamento dos elementos de medição das temperaturas da entrada (T4) e saída (T2) da água quente de aquecimento.

Os sinais de medição das quatro temperaturas (T1, T2, T3 e T4) gerados pelos elementos termoresistivos PT100 foram conectados eletricamente às entradas dos condicionadores de fabricação INCON, modelo CS01-1360 (INCON, 2010), cujas saídas são compatibilizadas às entradas analógicas da placa de aquisição de dados que opera na faixa de 0 a 10V.

Para a medida de vazão, o custo do instrumento é diretamente proporcional aos seguintes pontos críticos: temperatura de trabalho do fluído a ser medida, neste caso, máxima em 100°C; faixa da vazão do fluido de processo, que ocorre entre 3 l/min e 16 l/min. O sistema escolhido é de fabricação METROVAL modelo OI-2 SMRX/FS (METROVAL, 2010), cuja vista interna do sistema mecânico é ilustrada na Figura 37 e opera pelo princípio de engrenagens ovais, conforme ilustra a Figura 38. Este equipamento atende plenamente às condições exigidas, nos aspectos de repetibilidade, precisão, neutralização aos agentes químicos envolvidos e robustez física.

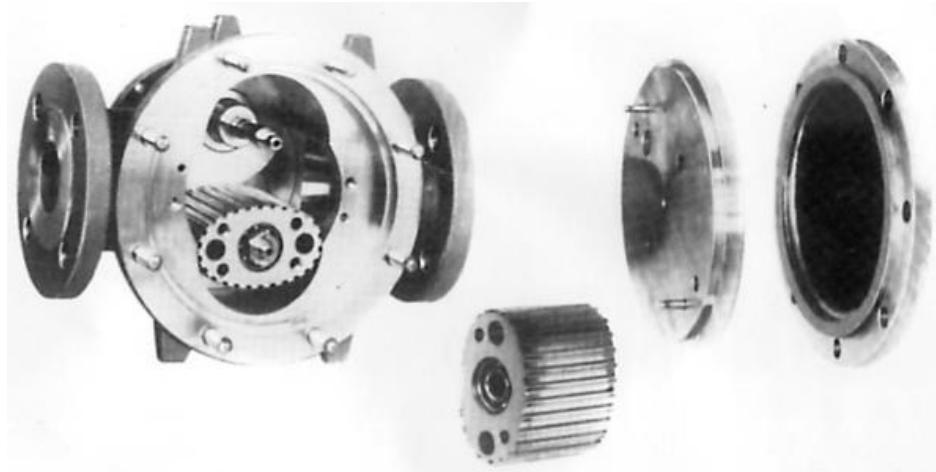


Figura 37 - Vista interna do medidor de vazão (METROVAL, 2007).

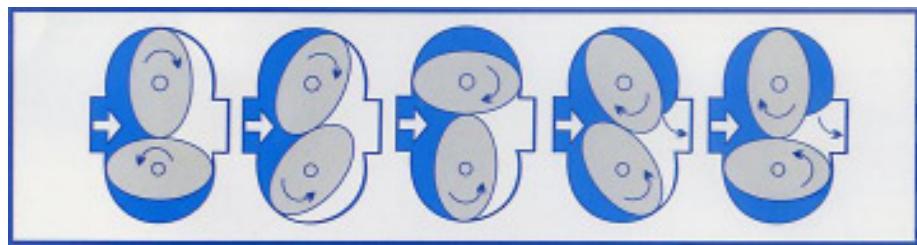


Figura 38 - Esquema com princípio de funcionamento das engrenagens ovais do medidor de vazão (METROVAL, 2007).

Ainda referindo-se ao medidor de vazão utilizado, este possui internamente um sensor com saída digital tipo pulsante, cuja frequência é proporcional ao valor da vazão medida. A saída deste sensor foi acoplada à unidade condicionadora de sinais modelo METROFLUX AG19 (METROVAL, 2007), gerando sinal proporcional de saída 4 a 20 mA. Tal sinal foi convertido em tensão na faixa 2 a 10 V utilizando-se um resistor de $510 \Omega \pm 1,0\%$, sendo esse sinal conectado a uma entrada analógica da placa de aquisição de dados. A Figura 39 ilustra o medidor de vazão instalado na planta e a Figura 40 a unidade conversora de sinal pulsante para analógico.



Figura 39 - Instalação do medidor de vazão METROVAL modelo OI-2 SMRX/FS.



Figura 40 - Acoplador do sinal de vazão METROVAL modelo METROFLUX AG19.

As aquisições das medições de pH do fluido de processo foram executadas utilizando-se um phmetro marca MICRONAL, modelo B-474, conforme ilustração da Figura 41 (MICRONAL, 2010). Este medidor gera um sinal serial com taxa de 9600 bps e dados no formato ASCII (ASCII, 2010). Foi desenvolvido um *software* em linguagem Delphi® (BORLAND, 2010), para receber o sinal serial proveniente do medidor de pH e registrá-lo em arquivo texto com taxa de amostragem de aproximadamente 1000 ms. Um programa desenvolvido na plataforma LabVIEW® captura o dado existente no arquivo texto de modo a obter o referencial de leitura do pH. A Figura 42 ilustra a tela do *software* para leitura do sinal serial do medidor de pH. A taxa de amostragem utilizada é compatível com o tempo de resposta das variáveis envolvidas.

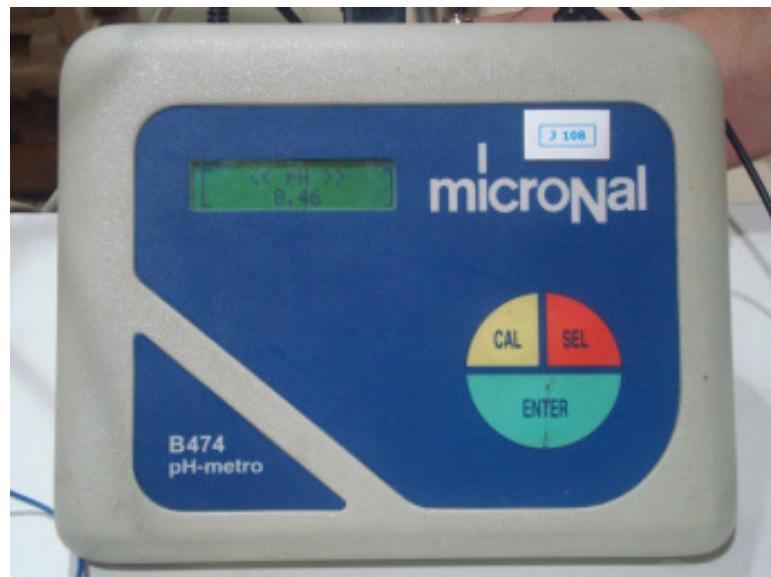


Figura 41 - Medidor de pH MICRONAL, modelo B-474 - phmetro

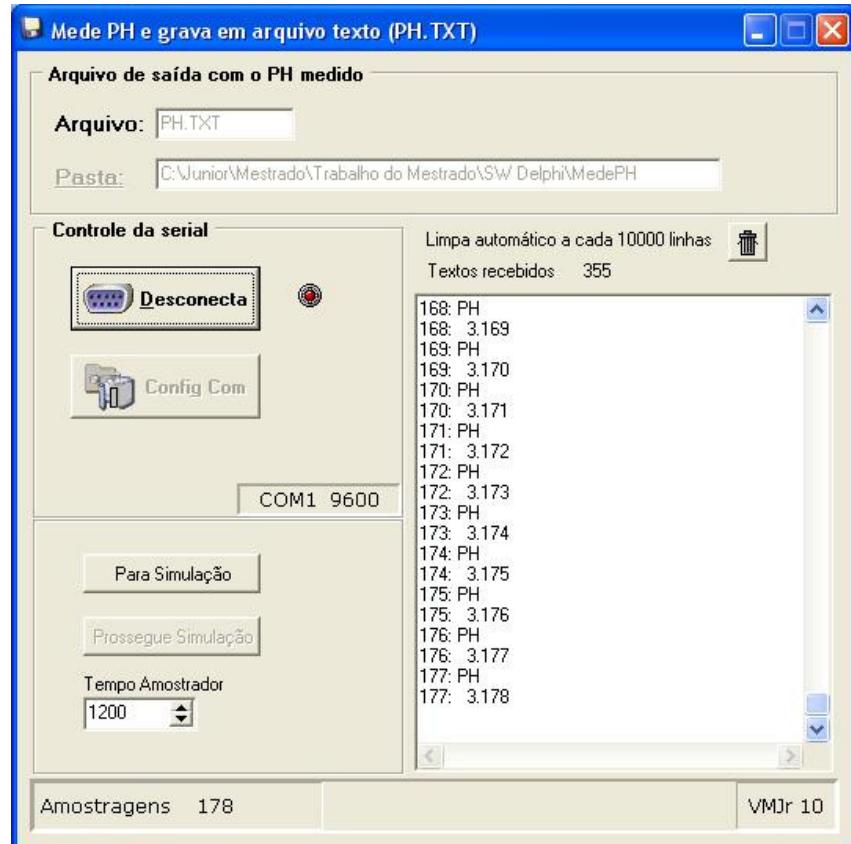


Figura 42 - Tela do programa para leitura do sinal serial de pH.

3.2.1.2 Elementos atuadores

O controle da bomba de deslocamento que permite variar a vazão do fluido de processo é realizado por um sinal analógico com faixa de operação 0 a 10 V, gerado por uma das saídas analógicas disponíveis na placa de aquisição de dados. Tal sinal é diretamente conectado na entrada de controle do inversor de frequência. O esquema elétrico das ligações do inversor de frequência é apresentado no **APÊNDICE B**. A Figura 43 ilustra o inversor de frequência utilizado para tal finalidade.



Figura 43 - Inversor de frequência.

O sinal de controle da válvula eletropneumática, citada no item 3.1, foi compatibilizado à saída analógica da placa de aquisição de dados, utilizando-se um conversor com entrada para sinal 0 a 10 V e saída 4 a 20 mA, fabricação INCON, modelo CS01-1662 (INCON, 2010). A válvula eletropneumática, cuja função é a de ajustar a quantidade de vapor misturada à água de aquecimento que resulta no controle da temperatura do processo, possui controle por pressão positiva de ar na faixa de 3 a 15 psi. Este sinal pneumático é gerado por um conversor I/P, conforme ilustrado na Figura 44, marca ENGINSTREL, modelo 621IPB, cuja entrada opera na faixa de 4 a 20 mA (ENGINSTREL, 2010).

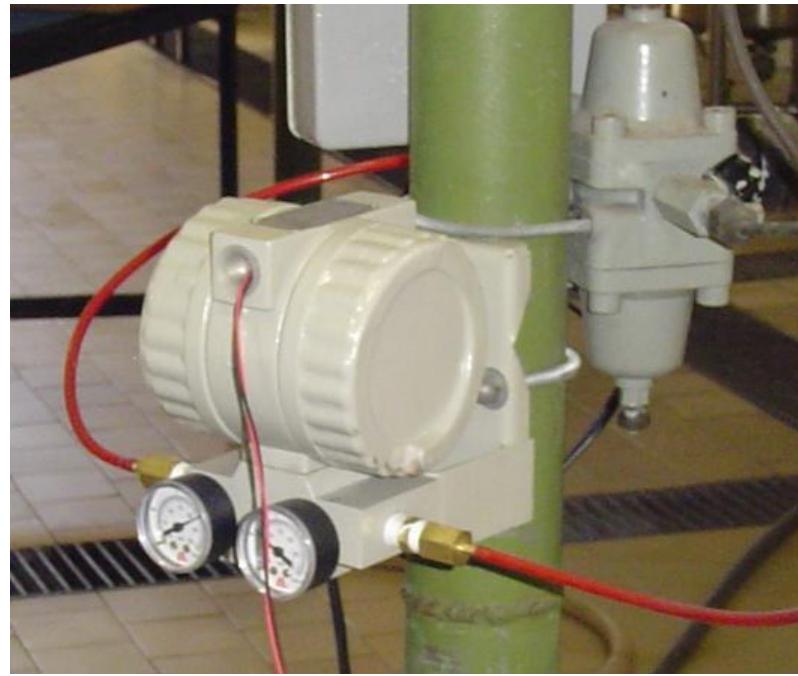


Figura 44 - Conversor I/P ENGINSTREL, modelo 621IPB

A Figura 45 ilustra os conversores utilizados para compatibilizar os sinais de entrada das medidas das temperaturas T1 a T4 e sinal de saída para controle da válvula eletropneumática de vapor.



Figura 45 - Condicionadores de sinais para medidas de temperaturas e atuação no conversor I/P da válvula eletropneumática de vapor.

4 IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO E MÉTODOS UTILIZADOS

Para se alcançar um dos objetivos propostos neste trabalho, que é o de determinar o comportamento do pH da saída do fluído de processo em função da vazão e temperatura na etapa de enxágue de um processo CIP, o método utilizado foi dividido nas etapas apresentadas a seguir:

- (i) ensaios para obtenção das curvas de resposta do sistema, no caso as respostas dinâmicas de vazão e temperatura do fluído de processo, visando desenvolver controladores em malha fechada para estas duas grandezas;
- (ii) sintonia de controladores PI e PID para controle de vazão e temperatura do fluído de processo, baseada em modelos determinados a partir das curvas do item (i);
- (iii) ensaios no trocador de calor para obtenção de modelos simplificados da etapa de enxágue do processo CIP, relacionando o pH da saída do fluído de processo em função da temperatura e vazão do mesmo, utilizando os controladores determinados em (ii);

4.1 Metodologia para obtenção das curvas de resposta de vazão e temperatura

O motivo desta etapa justifica-se perante a necessidade do conhecimento do comportamento dinâmico da temperatura de saída e vazão do fluído de processo quando introduzidas alterações, respectivamente, na válvula de controle de passagem de vapor e no controle de velocidade da bomba de fluxo do fluído de processo. Os resultados desta etapa são utilizados para a elaboração de controladores automáticos, ou em malha fechada, os quais permitem controlar vazão e temperatura do fluído de processo.

Utilizando-se a plataforma LabVIEW[®], foi desenvolvido um programa para controle, inicialmente, em malha aberta¹⁰ da vazão e temperatura do fluído de processo, possibilitando a coleta e registro das seguintes variáveis: ajuste de velocidade da bomba centrífuga do fluído

¹⁰ Nesta etapa os controles de temperatura e vazão não são automatizados, sendo seus ajustes executados de forma manual em escala 0 a 100%.

de processo, ajuste da posição da válvula de vapor, medida de vazão do fluído de processo (FT), medidas das temperaturas (TT1 a TT4) referentes ao fluído de processo e à água quente do corpo do trocador de calor, medida do pH na saída do fluído de processo. A tela principal e o diagrama em blocos do *software* utilizado podem ser vistos no **APÊNDICE D**.

O programa desenvolvido para coleta de dados permite as facilidades descritas a seguir:

- *set-point* da bomba (%): ajuste de 0 a 100 % do sinal de saída para controle da bomba de deslocamento do fluído de processo, possibilitando monitorar o valor do sinal em Volts;
- *set-point* da válvula de vapor (%): ajuste de 0 a 100 % do sinal de saída para controle da válvula de passagem de vapor, possibilitando monitorar o valor do sinal em Volts e a respectiva conversão para sinal de corrente 4 a 20 mA;
- arquivo de gravação: permite criar arquivos com diferentes nomes em função do ensaio em questão, registrando todas as grandezas de entrada e saída;
- amostragens: feitas em intervalos de 1000 ms e apresentando suas contagens acumulativas em tempo real;
- monitoração dos valores instantâneos das temperaturas, pH e vazão;
- apresentação de gráficos, em tempo real, dos valores medidos das temperaturas, pH e vazão.

Os sensores das temperaturas foram aferidos colocando-se os quatro elementos de medição de temperatura no reservatório de saída do fluído de processo para medirem simultaneamente uma mesma temperatura. Juntamente com os quatro elementos, foi colocado um termômetro digital de precisão modelo DT801 (INSTRUTEMP, 2010). Desta forma foi possível monitorar as variações das quatro temperaturas e comparar com o valor real.

A aquisição de dados experimentais para obtenção das curvas de respostas do sistema foi realizada em duas etapas, segundo descrição a seguir:

- (i) **vazão:** colocou-se a água em circulação com o trocador de calor na temperatura ambiente, válvula de vapor totalmente fechada (sinal de controle em 0 %) e sinal de controle da vazão com 70 %, equivalente à 7,0 V na saída de controle. Aplicaram-se degraus no *set-point* do controle da vazão, sendo os

- intervalos entre eles suficientes para que houvesse estabilização dos valores medidos;
- (ii) **temperatura:** colocou-se água em temperatura ambiente no reservatório de entrada do fluído de processo e após passagem pelo trocador de calor, a água aquecida resultante foi descartada. Aplicaram-se degraus no *set-point* do controle de temperatura pela válvula de passagem de vapor, sendo seus intervalos suficientes para que houvesse estabilização dos valores medidos.

Nos experimentos citados acima, utilizou-se água como fluído de processo no lugar de leite, por motivo de redução de custos. Para os experimentos que necessitaram de leite, não foram necessários novos ajustes dos controladores, visto que sua composição média é de 88% em água, 4,7% em lactose, 3,4% em gordura, 3,2% em proteína e o restante em minerais e pequenas quantidades de outras substâncias (BYLUND, 1995 apud BANSAL; CHEN, 2006), aproximando-se das características da água quanto ao escoamento.

Os dados foram registrados em arquivos texto e transportados para planilha do Microsoft Excel. Gráficos das curvas de resposta do sistema foram então gerados e analisados de maneira a se obter funções de transferência, na forma da equação (1).

4.2 Metodologia para sintonia dos controladores

Obtidas as curvas de resposta da vazão e temperatura do fluído de processo, gerou-se simulação utilizando a ferramenta SIMULINK / MATLAB[®] (MATWORKS, 2010), com propósito de escolher um método de sintonia adequado para os controladores de vazão e temperatura (malha fechada), sendo que os métodos testados estão descritos no item 5.2.

Feitas as simulações na plataforma MATLAB[®], aplicaram-se os métodos que apresentaram melhores resultados diretamente na planta, utilizando a plataforma do LabVIEW[®] para implementação dos controladores em malha fechada e monitoração das variáveis alvo: vazão e temperatura do fluído de processo. O programa desenvolvido possibilita ajuste no *set-point* da vazão de 3 l/min a 16 l/min e ajuste no *set-point* da temperatura de 25°C a 100°C. Os dados coletados foram registrados em arquivo texto pré-

nomeado. As telas contendo o painel frontal e diagrama em blocos do programa do programa em LabVIEW® do sistema são apresentadas no **APÊNDICE E**.

4.3 Metodologia para obtenção de modelo simplificado da etapa de enxágue

Em conformidade com um dos objetivos propostos neste trabalho, referente ao estudo da etapa de enxágue do processo CIP, faz-se necessária, a princípio, a execução completa do processo, desde a inicialização, que consiste em promover a sujidade do equipamento, até a etapa do estudo em questão. Como fluído de processo e agente incrustante foi utilizado leite tipo C em estado líquido e como detergente para a limpeza, solução de soda cáustica (NaOH). A Figura 46 ilustra o fluxograma com os procedimentos utilizados para a análise do processo CIP proposto, destacando em negrito a etapa de enxágue em estudo.

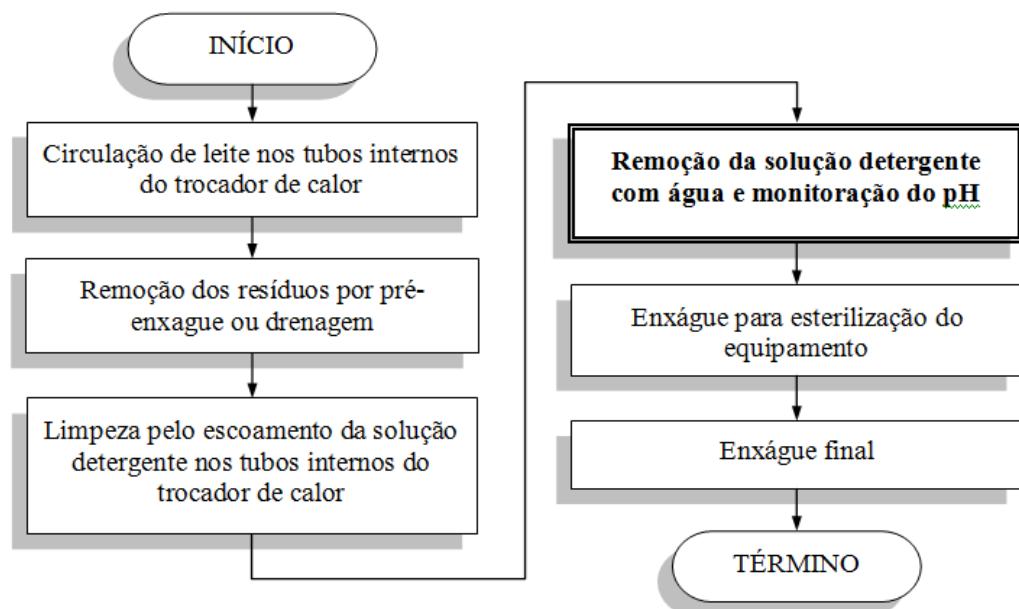


Figura 46 - Fluxograma básico com as etapas do processo CIP para estudo da etapa de enxágue.

A Figura 47 fornece um diagrama de blocos com as malhas de controle utilizadas para obtenção dos modelos desejados, permitindo melhor percepção das grandezas envolvidas nesta etapa. Como toda aquisição e controle foram desenvolvidos usando-se LabVIEW®, variáveis internas como TM (temperatura manipulada) e QM (vazão manipulada), podem ser facilmente registradas.

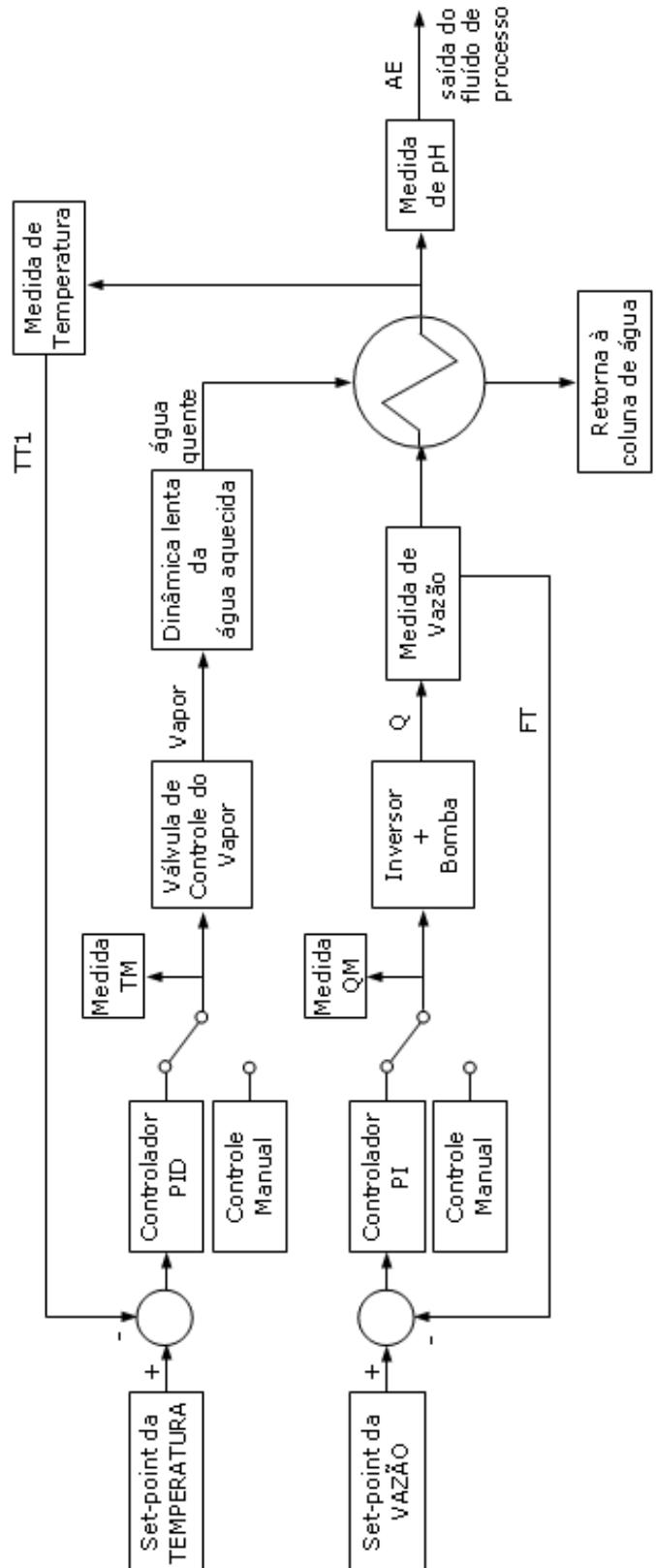


Figura 47 - Diagrama em blocos do processo para etapa da obtenção de modelos paramétricos.

A seguir descreve-se com mais detalhes os passos experimentais realizados, na planta objeto do estudo, tendo como base o fluxograma da Figura 46.

4.3.1 Execução da sujidade

Esta etapa tem por objetivo promover a incrustação do leite nos tubos internos do trocador de calor. Para isso realizaram-se os seguintes procedimentos:

- a. colocou-se o leite em circulação no trocador de calor por cerca de uma hora¹¹, com temperatura e vazão controladas em respectivamente 80 °C e 6 l/min;
- b. aguardou-se, com o trocador de calor em repouso por aproximadamente uma hora, para a consolidação do processo de incrustação nas paredes do mesmo.

4.3.2 Execução da pré-sanitização

Conforme descrito em 2.4.2, esta etapa consiste em remover o leite do interior dos tubos. No caso do equipamento utilizado, procedeu-se da forma descrita a seguir, a partir da etapa de sujidade anterior, considerando que o mesmo é do tipo *tanque unitário*, ou seja, possui apenas um reservatório para alimentação de entrada:

- a. ajustou-se o controle de temperatura para 50°C;
- b. manobrou-se as válvulas direcionais disponíveis na planta (Figura 26), de modo que a saída com o leite remanescente da etapa anterior contido no interior do trocador de calor fosse direcionado ao descarte;
- c. ligou-se a bomba de circulação do fluido de processo com ajuste para 9 l/min, mantendo-a nesta condição até que o volume no reservatório de entrada atingisse o nível mínimo¹²;

¹¹ Ensaios em placas de aço inox demonstraram que o tempo de uma hora é suficiente para promover a incrustação do leite às placas, na temperatura ambiente. O aumento da temperatura não acelera significativamente a incrustação.

¹² Entende-se como nível mínimo do reservatório, o volume mínimo de fluido em sua saída (cônica) que é acoplada ao início do circuito dos tubos do trocador de calor, de modo que seja impedida a entrada de ar no sistema.

- d. atingindo o nível mínimo, ligou-se água de alimentação proveniente da rede de utilidades do laboratório, na temperatura ambiente¹³;
- e. ao término da fase de leite na saída do descarte, a qual é perceptível pela alteração de coloração branca para translúcida, desligou-se a água de alimentação e simultaneamente manobrou-se as válvulas direcionais de modo que o fluido de processo da saída, constituído por água e eventuais resíduos de leite remanescentes da etapa anterior, fosse direcionado ao reservatório de entrada (P5 Figura 23), mantendo-o em circulação no trocador de calor;
- f. aguardou-se a temperatura da saída do fluido de processo estabilizar novamente em 50°C;
- g. adicionou-se NaOH no reservatório de entrada, de modo que a solução detergente final seja 0,5 % em massa¹⁴, valor comumente utilizado na indústria, para obter solução altamente alcalina com pH por volta de 12 (GEDRAITE et al., 2010);
- h. manteve-se circulação da solução detergente (NaOH) pelo período de uma hora com vazão controlada em 9 l/min e temperatura fixa em 50°C.

4.3.3 Execução do enxágue: remoção da solução detergente com água e monitoração do pH

Seguindo as recomendações citadas em 2.4.3 e considerando as características do equipamento utilizado, esta etapa consiste no estudo do processo de enxágue para remoção do detergente utilizado, cujos dados obtidos serão necessários na obtenção de modelos que representem o comportamento do pH em função da vazão e temperatura. Para tal, sua execução foi dividida em dois modos, conforme descritos em 4.3.3.1 e 4.3.3.2, onde, em cada um deles, faz-se necessário, a princípio, reiniciar e executar as duas etapas anteriores, sujidade e pré-sanitização. A necessidade da execução da etapa de sujidade para obtenção do comportamento do pH é avaliada no capítulo 5.

¹³ Por características de construção, o equipamento utilizado para os estudos dispensa pré-aquecimento da água de alimentação. Ensaios mostraram que o controle da temperatura é realizado mesmo quando se utiliza alimentação com água na temperatura ambiente.

¹⁴ O volume total de líquido (fluido de processo), que consiste na quantidade de líquido dos tubos internos mais a quantidade do reservatório de entrada na marca mínima, resulta em 70 litros. Portanto, a massa de NaOH a ser adicionada na água para esta etapa é de 350g.

Referente à variável alvo deste estudo, que é o pH do fluído de processo descartado e resultante do enxágue, sua medição foi feita de forma dinâmica, em um tanque intermediário de passagem entre a saída de descarte do trocador de calor e a entrada da rede de captação de rejeitos do laboratório, proporcionando escoamento sem turbulência, de forma a possibilitar medida correta pelo phmetro disponível.

Para obtenção do pH da água utilizada nos ensaios, a qual é proveniente da rede de utilidades do laboratório, foram executadas medições em temperatura ambiente e obteve-se variação entre 7,8 e 7,9, adotando-se, portanto, essa faixa, como os valores finais e mínimos de pH (considerado como neutro).

4.3.3.1 Enxágue com variação da temperatura

Nesta etapa, manteve-se a vazão constante e executou-se a aquisição dos dados, conforme o protocolo descrito a seguir:

- a. terminada a circulação da solução detergente, manobra-se as válvulas direcionais disponíveis na planta de modo que a solução (fluído de processo) seja direcionada ao tanque intermediário de saída, para medição do pH e descarte;
- b. aguarda-se até que a solução de NaOH chegue ao fim do reservatório de entrada do fluído de processo. Nesse momento aplica-se um degrau no *set-point* do controlador de temperatura (em malha fechada) e simultaneamente liga-se a alimentação da água da rede com temperatura ambiente para o reservatório de entrada e inicia-se a aquisição de dados;
- c. aguarda-se até o momento em que o pH da saída do fluído de processo tenha o valor igual ao da água utilizada (pH neutro), registrando as grandezas dinâmicas do sistema ao longo do tempo: vazão medida (FT), temperaturas medidas (TT1 a TT4) e valores de pH;
- d. repete-se o procedimento para vários valores de temperatura.

4.3.3.2 Enxágue com variação da vazão

Semelhante aos procedimentos realizados no item anterior 4.3.3.1, neste caso mantém-se a temperatura constante e varia-se a vazão, conforme os passos descritos a seguir:

- a. terminada a circulação da solução detergente, manobram-se as válvulas direcionais de modo que a solução (fluído de processo) seja direcionada ao tanque intermediário de saída, para medição do pH e descarte;
- b. aguarda-se até que a solução de NaOH chegue ao fim do reservatório de entrada e desliga-se a bomba de escoamento do fluído de processo;
- c. aplica-se um degrau no *set-point* do controlador de vazão (em malha fechada), simultaneamente liga-se a alimentação da água da rede, em temperatura ambiente, para o reservatório de entrada e inicia-se a aquisição de dados;
- d. aguarda-se até o momento em que o pH da saída do fluído de processo tenha o valor igual ao da água utilizada pH (pH neutro), registrando as grandezas dinâmicas do sistema ao longo do tempo: vazão medida (FT), temperaturas medidas (TT1 a TT4) e valores de pH;
- e. repete-se o procedimento para vários valores de vazão.

4.3.4 Modelos aproximados da etapa de enxágue

Através dos dados obtidos em 4.3.3, identificaram-se modelos simplificados para o comportamento do pH do fluído de processo durante a etapa de enxágue. Para tanto, foram gerados modelos aproximados de 1^a e 2^a ordem com tempo morto, simulados em SIMULINK/MATLAB® e comparados com os dados obtidos experimentalmente, de modo a verificar se os mesmos permitem explicar o comportamento do pH durante a etapa de enxágue, em função da vazão e temperatura.

4.4 Filtragem dos sinais

Para a remoção de ruído das curvas de comportamento do pH da saída do fluído de processo obtidas experimentalmente, utilizou-se o algoritmo *Wavelet* disponibilizado na

plataforma MATLAB®. Esta ferramenta pode ser acessada pelo comando *[wavemenu]* diretamente na área de comando (*command window*), direcionando ao menu de opções, do qual utilizou-se a opção *SWT Denoising 1-D (Stationary Wavelet Transform)*, por ser a mesma aplicável à sinais unidimensionais. A importação e exportação de dados para o aplicativo podem ser realizadas pela área de trabalho (*work space*), podendo-se também ler ou gravar os dados em disco no formato de texto (.txt).

Os parâmetros utilizados nas filtragens pelo algoritmo *wavelet* foram selecionados de forma empírica. Utilizou-se o SIMULINK/MATLAB® para simular um sinal senoidal com ruído, cujo resultado é mostrado na Figura 48. Os parâmetros do sinal senoidal foram selecionados segundo a ordem de grandeza da variação do comportamento do pH em estudo, obtida no capítulo 5, ou seja, período de 500 segundos (ordem de grandeza da constante de tempo da curva do pH) e amplitude variando entre 12 e 7 (valores máximo e mínimo do pH). Para o ruído, utilizou-se um gerador aleatório com amplitude ± 1 (variação máxima do ruído no sinal coletado) e período 1 segundo (tempo de amostragem utilizado na coleta dos dados).

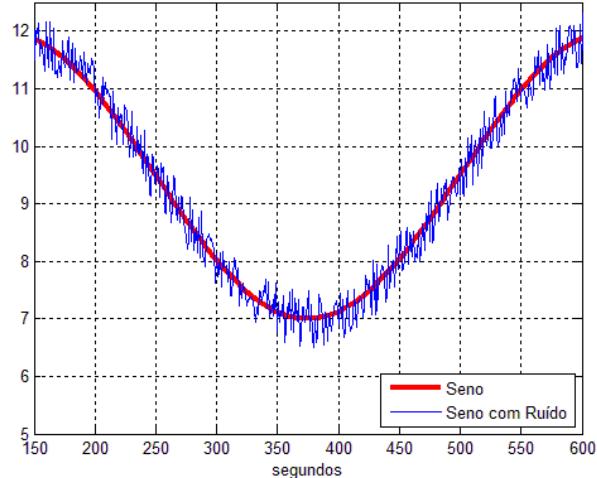


Figura 48 - Simulação de um sinal senoidal com ruído.

Com o sinal simulado da Figura 48, utilizou-se a transformada *wavelet* para a remoção do ruído, comparando este resultado com a senóide originalmente utilizada, obtendo-se um bom desempenho de filtragem para o estudo em questão, conforme ilustrado pelo gráfico da Figura 49. Para padronizar os processos de filtragem dos dados coletados nos ensaios da etapa

de enxágue, utilizaram-se os mesmos parâmetros encontrados nesta simulação, lembrando que as características dos sinais simulados são próximas às dos dados reais.

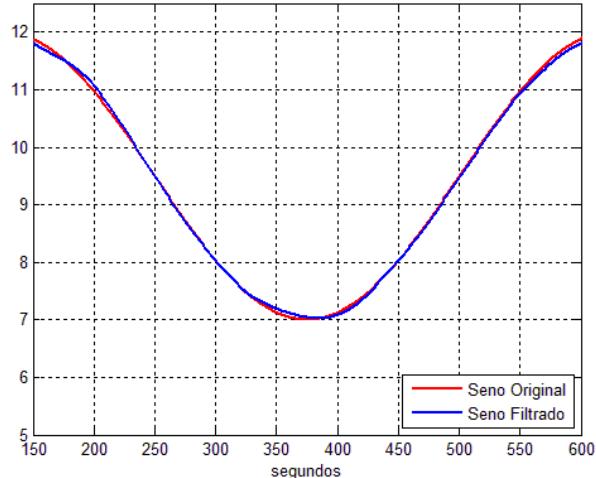


Figura 49 - Comparação do sinal senoidal sem ruído original e resultado após filtragem

Os parâmetros do *wavelet* que melhor adaptaram-se à filtragem são apresentados abaixo:

- função *Haar*: escolheu-se esta função por apresentar bons resultados em filtragens testadas preliminarmente;
- 5 níveis: os níveis geram a *árvore de decomposições* citada em 2.7.2.2, sendo que foi utilizado o valor padrão (*default*) sugerido pelo *toolbox* do MATLAB®;
- *threshold* (limiar): utilizado o tipo *soft*, o qual zera os valores do sinal abaixo do limiar especificado, conforme citado em 2.7.3. Utilizaram-se os valores padrão da ferramenta, ou seja, 2963 para nível 1 e 3997 para os demais;

A Figura 50, a título de exemplo, ilustra a tela do aplicativo mostrando os sinais referentes a um ensaio com degrau na vazão de 0 para 9 l/min, onde a nomenclatura *Signal (S)* corresponde ao sinal original e *De-Noised Signal (D_S)* ao sinal após filtragem.

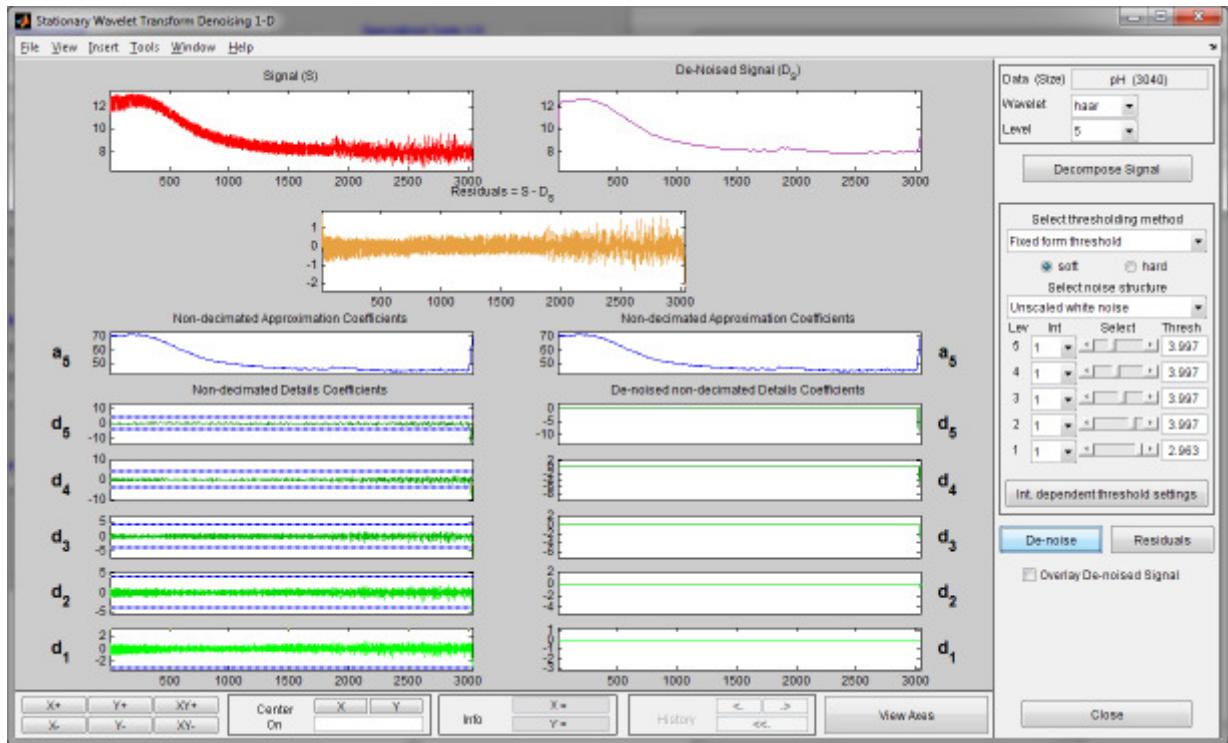


Figura 50 - Exemplo de filtragem utilizando a ferramenta *Wavelet* do MATLAB® para ensaio com degrau na vazão.

5 RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÕES

5.1 Curvas de respostas de vazão e temperatura

As curvas de resposta temporal da vazão e da temperatura do fluído de processo foram obtidas conforme descrito em 4.1.

Foram feitos ensaios para a obtenção dos parâmetros do processo referentes à vazão, cujo comportamento temporal é ilustrado na Figura 51. Neste ensaio partiu-se com vazão em regime permanente de 7 l/min e aplicou-se degrau positivo de 3 l/min no tempo 32 s, aguardou-se estabilização, e em seguida aplicou-se degrau negativo de 3 l/min no tempo 203 s. Adotou-se o primeiro degrau (7 l/min a 10 l/min) para obtenção dos parâmetros do processo, cujos resultados são apresentados ao longo deste item, sendo que os demais degraus apresentaram comportamentos simétricos. Como dito em 4.1, utilizou-se água nesta etapa do ensaio.

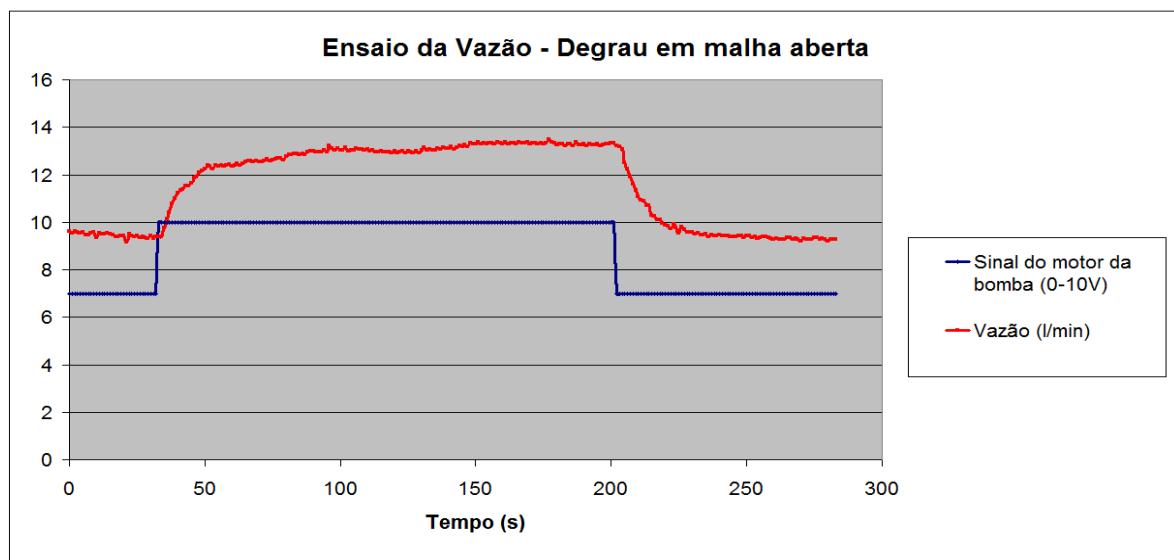


Figura 51 - Ensaio de medida da vazão com degraus simétricos no *set-point* de 7 l/min para 10 l/min.

No ensaio utilizado para a temperatura, cuja resposta temporal é ilustrada na Figura 52, utilizou-se vazão constante de 9 l/min. Partiu-se com a saída do fluido de processo na temperatura de 60°C, aplicou-se degrau no *set-point* do controle de abertura da válvula de vapor em 50 % em $t=50$ s e degrau de 60 %, em relação ao valor inicial, em $t=1430$ s. As

análises para obtenção dos parâmetros do processo foram realizadas referenciando-se o primeiro degrau (50%).

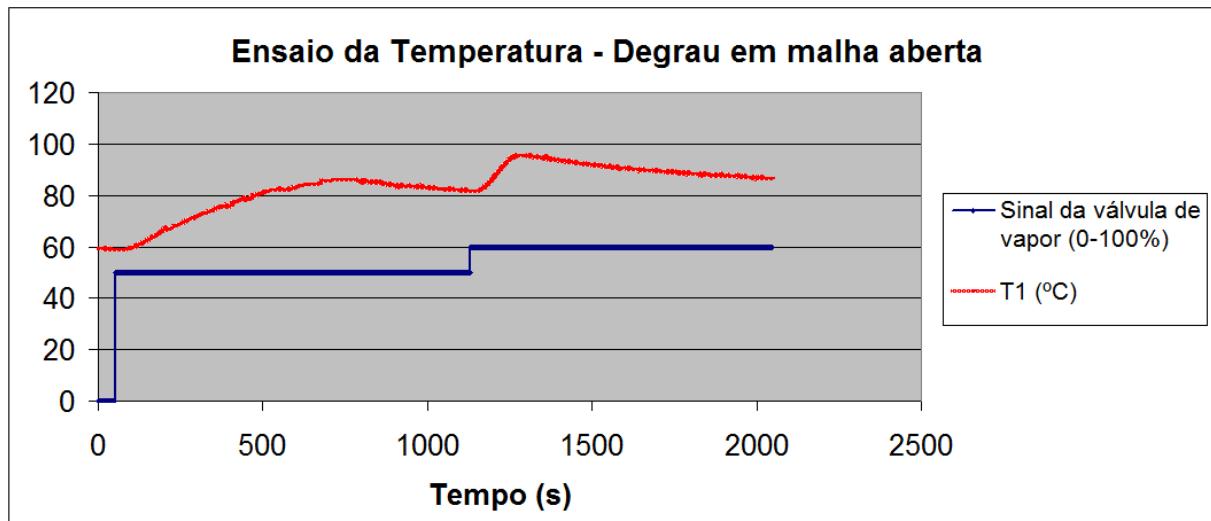


Figura 52 - Ensaio de medida de temperatura da saída do fluido de processo.

Os parâmetros do processo, K sendo o ganho proporcional, τ a constante de tempo do processo e θ o atraso de transporte, foram calculados segundo dois métodos citados em 2.6.1.1, métodos de *SMITH* e *MILLER*, os quais forneceram resultados semelhantes. As funções de transferência obtidas são mostradas a seguir:

$$(i) \text{ para a vazão: } K = 1,30 \frac{l}{\text{min}.V}; \tau = 14,0 \text{ s; } \theta = 2,00 \text{ s}$$

$$G(s) = \frac{1,30.e^{-2,00.s}}{14,0.s + 1} \quad (29)$$

$$(ii) \text{ para a temperatura: } K = 7,22 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}; \tau = 378 \text{ s; } \theta = 78,0 \text{ s}$$

$$G(s) = \frac{7,22.e^{-78,0.s}}{378.s + 1} \quad (30)$$

5.2 Sintonias dos controladores de vazão e temperatura

Utilizando os parâmetros do processo obtidos (K , τ e θ) no item 5.1, foi gerada uma planilha com os cálculos baseados em vários métodos para sintonia de controladores propostos em CAMPOS e TEIXEIRA (2007), sendo eles: ZN - *Ziegler & Nichols*, CHR - *Chien-Hrones-Reswick*, CC - *Cohen & Coon*, ITAE - *Integral do Módulo do Erro vezes o Tempo* por *Lopez et. al.* (1967) e ITAE por *Rovira et. al.* (1969). Os parâmetros dos controladores (tipo P, PI e PID) calculados para vazão e para temperatura são apresentados no **APÊNDICE C**, onde: K_p é o ganho proporcional, T_i a constante de tempo integral e T_d a constante de tempo derivativa.

A partir dos parâmetros de sintonia dos controladores calculados, executaram-se simulações de controladores tipo PI e PID, para vazão e temperatura, com a ferramenta SIMULINK em ambiente MATLAB[®], com o propósito de se obter aproximação dos melhores métodos de sintonia para serem testados na planta. A Figura 53 ilustra, como exemplo, uma das telas utilizadas nas simulações em ambiente MATLAB[®].

Dos resultados obtidos das simulações, escolheram-se para testes na planta real, dois controladores tipo PI para a vazão, sintonizados respectivamente pelos métodos de *Cohen & Coon* e *ITAE* por *Rovira*. Para a temperatura escolheram-se dois controladores tipo PID com sintonias pelos métodos *CHR critério sem sobrevalor* e *ITAE* por *Lopez*.

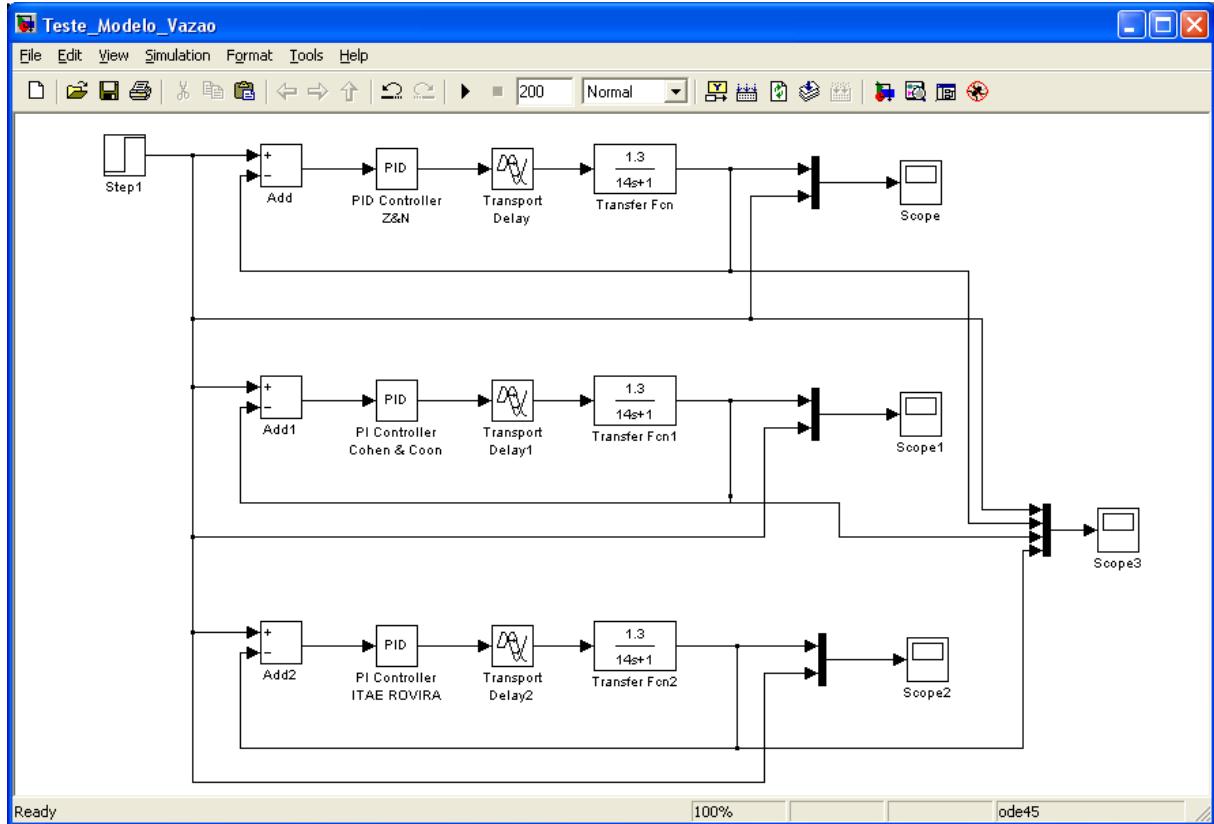


Figura 53 - Exemplo de programa MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores testados.

A Figura 54 apresenta as curvas obtidas na simulação da vazão do fluido de processo, sendo os resultados referentes às sintonias pelos métodos *Cohen & Coon* e *ITAE* por *Rovira*. A Figura 55 apresenta as curvas obtidas na simulação da temperatura (T1) do fluido de processo, com os resultados pelos métodos: *ITAE* por *Lopez* e *CHR critério sem sobrevalor*.

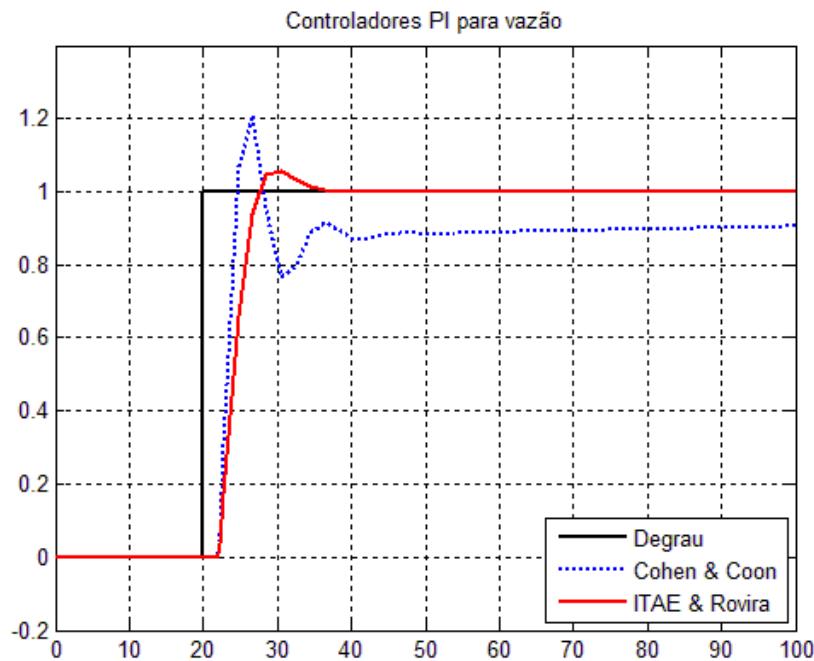


Figura 54 - Respostas dos controladores tipo PI na vazão do fluído de processo simulados em MATLAB®.

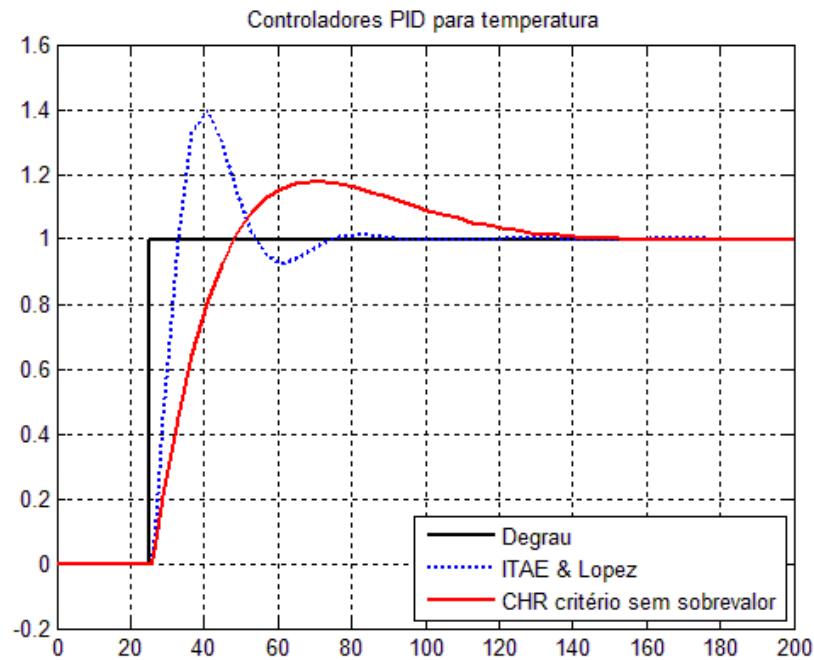


Figura 55 - Respostas dos controladores tipo PID na temperatura da saída do fluído de processo simulados em MATLAB®.

Foram feitos então ensaios na planta do trocador de calor, utilizando controladores desenvolvidos na plataforma LabVIEW[®], conforme descrito em 4.2. Os controladores de vazão e temperatura foram sintonizados inicialmente com os resultados dos modelos obtidos em simulação. Todos os ensaios foram realizados com uma taxa de amostragem de 1 segundo.

5.2.1 Sintonia do controlador da vazão do fluído de processo

Para o ensaio da vazão, o melhor resultado obtido foi utilizando controlador PI com sintonia pelo método *ITAE* por Rovira. Os valores calculados e utilizados na planta real foram: $K_p = 2,680$ e $T_i = 0,101$ s.

A Figura 56 ilustra a resposta da vazão do fluido de processo medida em função da variação do *set-point* no processo real, em malha fechada. Iniciou-se o ensaio em $t = 0$ s com vazão de 11 l/min, entrada com água fria. Na amostragem 550 s aplicou-se degrau no *set-point* de 11 l/min para 10 l/min. Na amostragem 720 s aplicou-se degrau de 10 l/min para 11 l/min. Nota-se, pela figura, que o controlador proposto forneceu uma boa resposta transitória e estacionária da variável controlada.

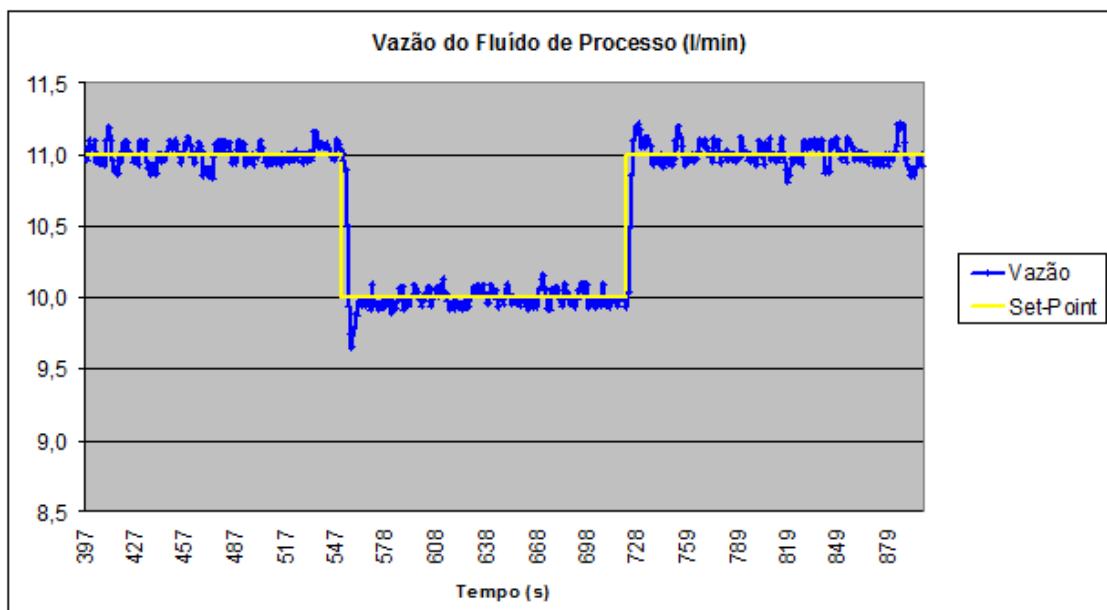


Figura 56 - Resposta do controlador sintonizado da vazão do fluido de processo implementado na plataforma LabVIEW[®].

5.2.2 Sintonia do controlador da temperatura de saída do fluído de processo

O controlador da temperatura da saída do fluído de processo (T1) foi implementado no LabVIEW® em dois módulos: um para controle de subida da temperatura e outro para a descida. Isto se deve às limitações do controle de temperatura na planta utilizada. Como descrito no item 3.1, utiliza-se vapor para aquecimento do sistema resultando em menor tempo de resposta quando comparado ao resfriamento, que ocorre basicamente por troca térmica com o meio ambiente. Os controladores analíticos foram obtidos apenas para atuarem no aumento da temperatura (T1). Os valores calculados foram re-sintonizados manualmente na planta real, de maneira a melhorar o desempenho do controle obtido. Para diminuição da temperatura (T1), um controlador proporcional foi sintonizado manualmente. Os resultados obtidos foram:

- (i) controle da subida → tipo PID, sintonia inicial pelo método *CHR*, parâmetros de sintonia finais: $K_p = 0,694$; $T_i = 3,640$ s e $T_d=0,621$ s
- (ii) controle da descida: tipo P, com $K_p = 0,080$.

O ensaio foi realizado com água em vazão constante de 9 l/min e temperatura inicial da saída do fluído de processo estabilizada em aproximadamente 48°C. Foram realizadas as seguintes variações no *set-point* da temperatura:

- amostragem 185 s degrau para 53°C;
- amostragem 460 s degrau para 57°C;
- amostragem 648 s degrau para 64°C;
- amostragem 860 s degrau para 70°C;
- amostragem 1260 s degrau para 65°C;
- amostragem 1530 s degrau para 60°C;
- amostragem 1720 s degrau para 50°C.

A Figura 57 ilustra a resposta da temperatura da saída do fluído de processo medida, em função das variações de *set-point* apresentadas. As respostas obtidas são satisfatórias tendo em vista os altos valores das constantes de tempos envolvidas nos processos de aquecimento e resfriamento.

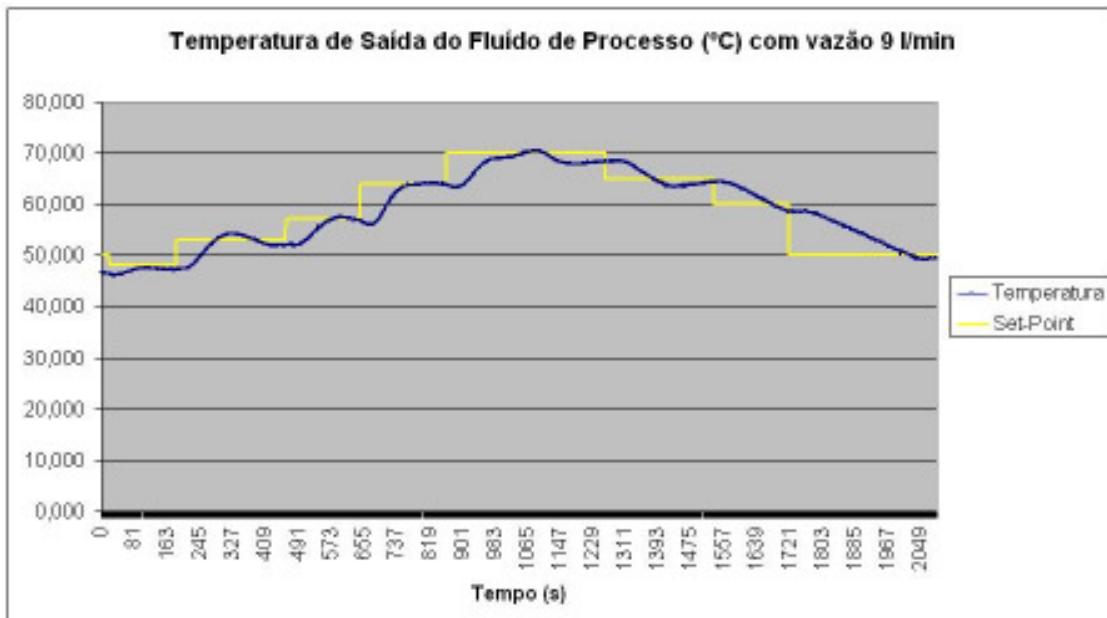


Figura 57 - Resposta do controlador sintonizado da temperatura da saída do fluido de processo implementado na plataforma LabVIEW®.

5.3 Análise da curva de resposta do phmetro utilizado

Sendo o pH a principal variável de interesse resultante nos ensaios da etapa de enxágue, conforme citado em 4.3.3, levantou-se a curva de resposta do medidor de pH (phmetro) utilizado com a variação da temperatura, para eventuais correções. Embora tal instrumento seja dotado de um termômetro para efetuar compensações automaticamente, o objetivo desta análise é a validação do instrumento para a aplicação em questão.

Para tanto, foi preparada uma solução detergente de NaOH igual à utilizada na etapa de pré-sanitização, descrita em 4.3.2. Em um recipiente de vidro tipo copo Becker adicionou-se 100 g de água com 5,0 g de NaOH. O recipiente com a solução foi colocado em um sistema de agitação com aquecimento resistivo. Partindo-se da temperatura ambiente, a solução foi aquecida até 90°C, anotando-se valores intermediários do pH medido. O resultado da curva obtida neste ensaio é ilustrado na Figura 58. É possível concluir que a variação não é significativa na faixa de temperaturas do estudo, apresentando desvio por volta de 0,6 na faixa de 50 a 80°C. Tal variação é considerada aceitável para os estudos que se propõem neste trabalho.

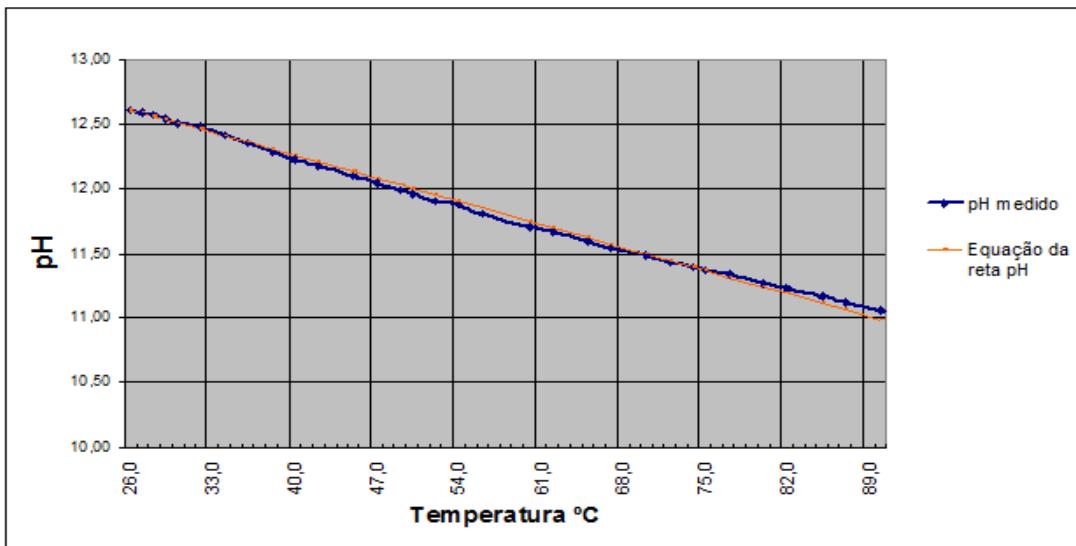


Figura 58 - Curva do comportamento do phmetro utilizado em função da variação de temperatura da solução a ser medida.

5.4 Pré-analise das curvas de pH

Foram realizados ensaios preliminares com valores diferenciados de degraus de temperatura e vazão, com objetivo de entender o comportamento geral do sistema. Considerando-se que para a execução de um ensaio completo são gastas quantidades significativas de leite (cerca de 70 litros), tempo para incrustação (cerca de 2 horas), energia elétrica, entre outros; resolveu-se verificar se a incrustação com leite era significativa no comportamento da etapa de enxágue. Para tal, foram realizados ensaios reduzidos, partindo-se da etapa de pré-sanitização descrita em 4.3.2, suprimindo-se a execução de sujidade proposta em 4.3.1, ou seja, focando a remoção da solução detergente, sem incrustação de leite.

Dentre os ensaios realizados, a Figura 59 apresenta os resultados do comportamento do pH na etapa de enxágue para variação da vazão de 0 a 9 l/min em temperatura constante de 50°C, com o fluido de processo preparado em dois modos: com sujidade de leite mais pré-sanitização, somente a partir da etapa de pré-sanitização.

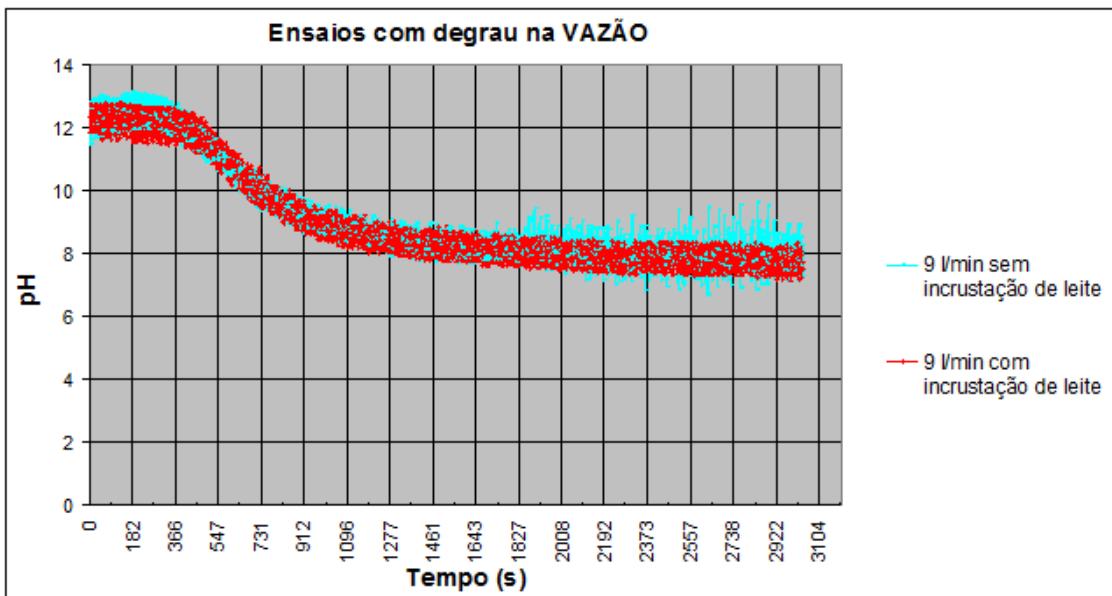


Figura 59 - Comparação de enxágue com e sem pré-incrustação com leite; degrau na vazão de 0 para 9 l/min e temperatura fixa 50°C.

Em decorrência do sinal de pH obtido apresentar alto grau de ruído, recorreu-se à ferramenta de filtragem *Wavelet*, conforme metodologia citada em 4.4. As curvas do pH filtradas, são apresentadas na Figura 60, de onde é possível notar considerável melhoria em relação às curvas sem filtragem apresentadas na Figura 59. O algoritmo *Wavelet* foi adotado nos demais ensaios realizados, como processo de filtragem para análise e interpretação dos dados, utilizando os mesmos parâmetros apresentados em 4.4.

Deve-se também salientar que obteve-se melhoria significativa no desempenho do phmetro, minimizando o ruído de medida, através da limpeza de seu elemento sensor com solução saturada de KCl (cloreto de potássio) em água.

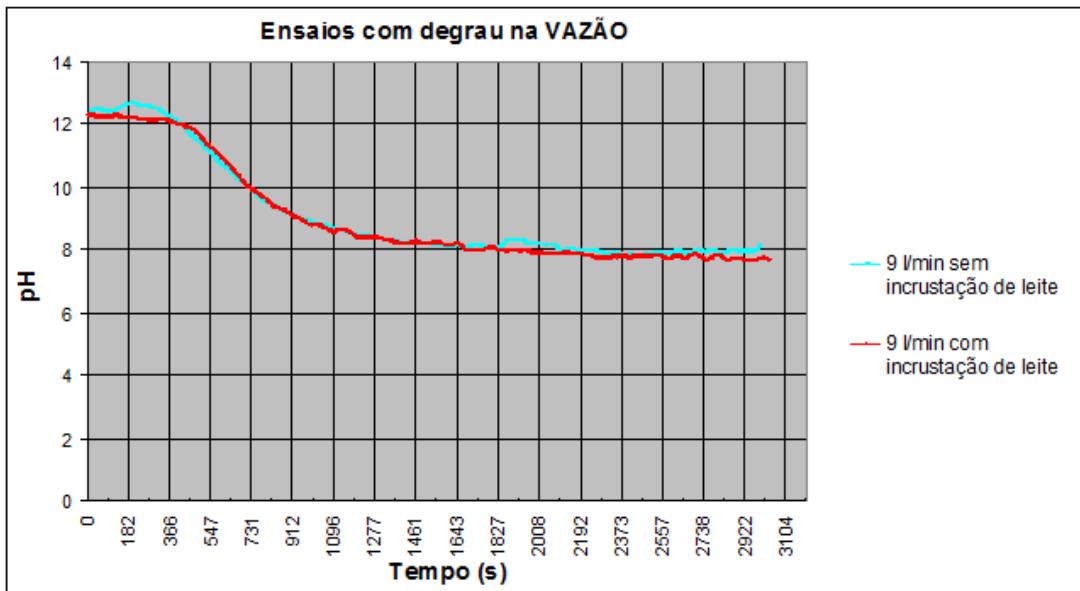


Figura 60 - Comparaçāo de enxágue com e sem pré-incrustaçāo com leite; degrau na vazão de 0 para 9 l/min e temperatura fixa 50°C; apóis filtragem.

Analizando a Figura 60 nota-se que os ensaios realizados com a etapa completa, considerando a sujidade com leite, apresentam comportamento, quanto ao pH na etapa de enxágue, similar aos ensaios realizados sem esta sujidade. Tal comportamento justifica-se devido ao fato que na etapa de enxágue a quantidade de leite existente nos tubos do trocador de calor é muito pequena, tendo em vista que a etapa anterior, pré-sanitização, tem como objetivo principal remover o leite presente em estado líquido e incrustado. Portanto, justifica-se realizar os demais experimentos sem incrustaçāo com leite, utilizando-se somente a solução de NaOH. Tal procedimento gera considerável economia de energia elétrica e leite durante o ensaio.

5.5 Curvas do pH segundo variações de temperatura

Levando em conta os objetivos deste trabalho, foram realizados ensaios de maneira a verificar a influênciā da temperatura no comportamento do pH do fluído de processo.

As curvas de variação do pH do fluído de processo na etapa de enxágue, apresentados na Figura 61, foram obtidas utilizando vazão de 9 l/min, sendo um ensaio em temperatura fixa de

50°C e os demais com variações tipo degrau, aplicados de 50°C para 60 °C, 70 °C e 80°C respectivamente, seguindo o protocolo descrito em 4.3.3.1.

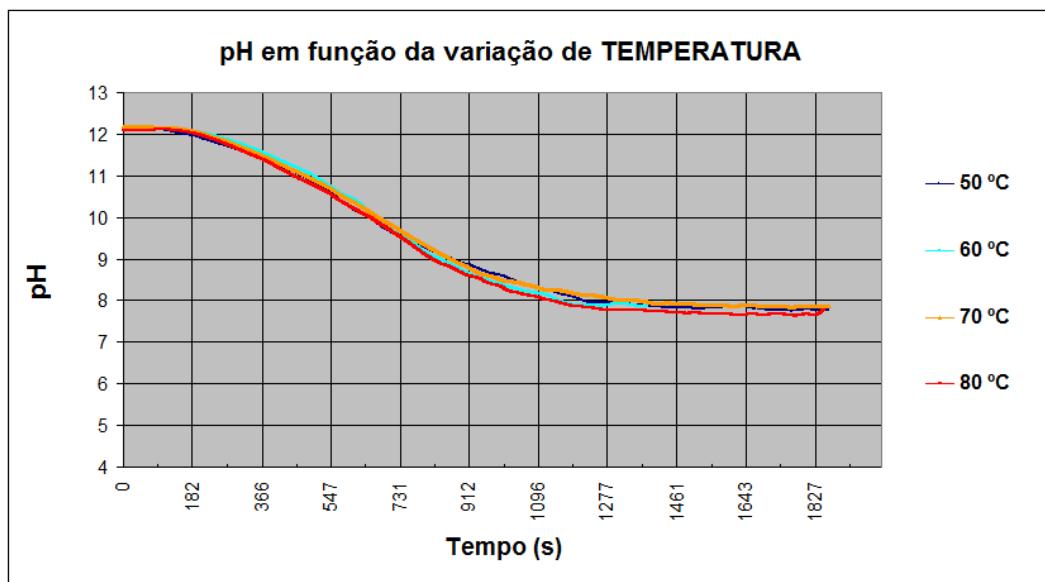


Figura 61 - Comparação do comportamento do pH com variação de temperatura, na vazão de 9 l/min.

Analizando-se a Figura 61, nota-se, visualmente, que o comportamento do pH não apresenta variação significativa nas temperaturas envolvidas no processo. Tal fato mostra que a temperatura não é um parâmetro relevante para o decréscimo do pH durante a etapa de enxágue, não contribuindo para a diminuição do tempo de remoção da solução detergente (pH neutro).

5.6 Curvas do pH segundo variações de vazão

Os ensaios para obtenção das curvas do pH em função da vazão foram efetuadas segundo os procedimentos descritos em 4.3.3.2, utilizando-se degraus na vazão de 0 l/min para 4 l/min, 6 l/min, 7,5 l/min, 9 l/min, 10,5 l/min, 12 l/min, 14 l/min e 16 l/min.

Pelos resultados apresentados no gráfico da Figura 62, percebe-se que o tempo para a realização do enxágue, ou seja, para chegar à neutralidade da água (conforme citado em 4.3.3), diminui com o aumento do valor da vazão, como esperado, mas não de forma proporcional.

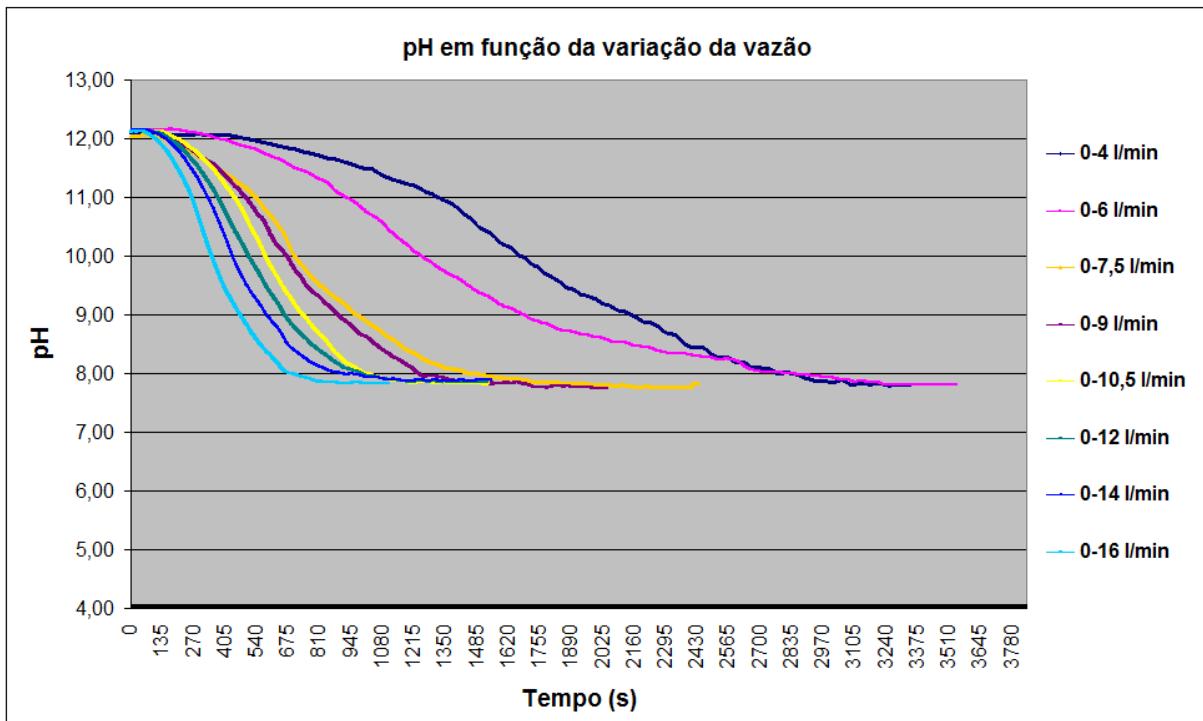


Figura 62 - Comparação do comportamento do pH com variação de vazão, na temperatura fixa de 50°C.

Através da instrumentação proposta, pode-se medir o intervalo de tempo entre o instante inicial da etapa de enxágue, com pH máximo (em torno de 12 na Figura 62), até o momento em que o pH apresenta estabilidade em torno de seu valor neutro (7,8 para a água utilizada). Tal intervalo corresponde ao tempo total de enxágue. Determinando esse intervalo de tempo a cada ensaio em função da vazão utilizada, obtém-se a curva apresentada na Figura 63, de onde é possível notar que o valor do tempo de enxágue é sensível à vazão utilizada, entretanto, sua influência não é linear. Com uma vazão acima de um dado valor, no caso 13 l/min para a planta em estudo, não é possível diminuir o tempo de enxágue de maneira significativa. Portanto, para vazões acima de 13 l/min, esse tempo permanece praticamente constante, aumentando-se apenas o gasto de água.

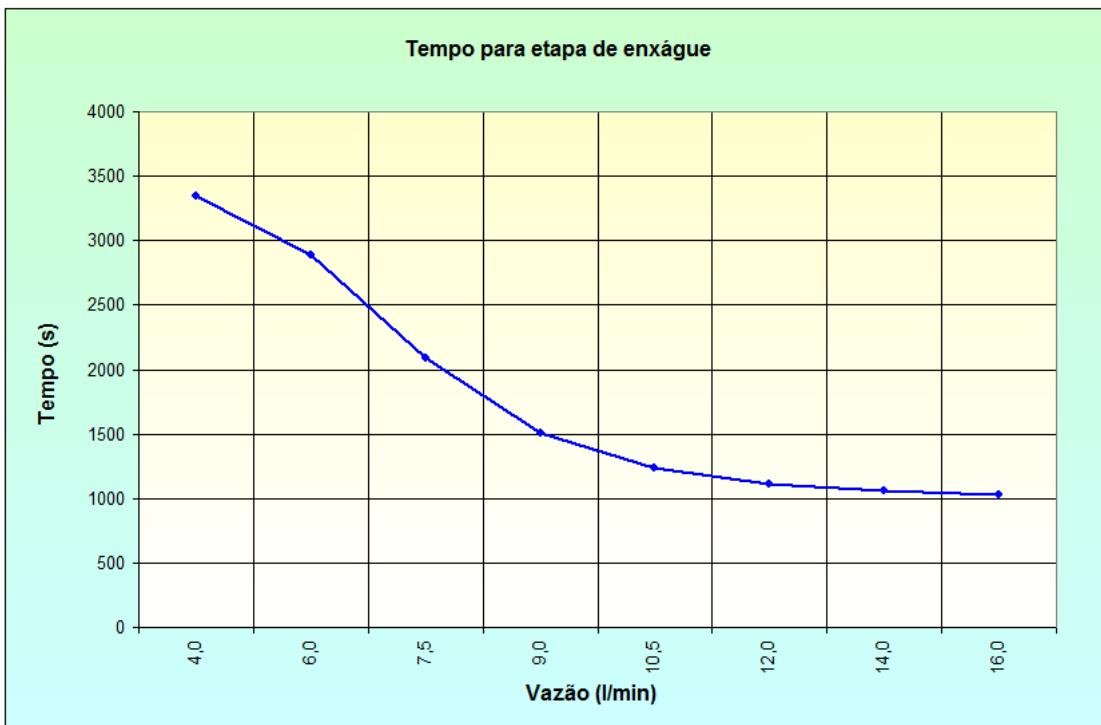


Figura 63 - Tempo total de enxágue em função da vazão utilizada.

5.7 Identificação de modelo simplificado da etapa de enxágue

Buscando modelos para aproximar a curva de comportamento do pH em função da vazão, nota-se, pela Figura 62, tratar-se de um sistema sobreamortecido. Estudou-se dois modelos possíveis: (i) aproximação para modelo de 1^a ordem com atraso de transporte e (ii) modelo de 2^a ordem sobreamortecido com atraso de transporte.

Para o modelo de 1^a ordem, utilizou-se o método de *SMITH* descrito em 2.6.1.1 para a obtenção dos parâmetros da equação (1) que o representa. A implementação do modelo de 2^a ordem, na forma da equação (12), deu-se segundo o método descrito em 2.6.1.2, o qual exige processo computacional para sua obtenção. Para essa finalidade, foi desenvolvido um programa em ambiente MATLAB® que integra a obtenção dos parâmetros para os modelos de 2^a ordem, simulação dos modelos de 1^a e 2^a ordem e geração de gráficos para comparar os modelos obtidos com os dados experimentais. O *script* deste *software* bem como o modelo em SIMULINK é fornecido no APÊNDICE F.

Os resultados numéricos dos parâmetros obtidos para os dois modelos são apresentados na Tabela 3 e as simulações dos mesmos, junto com os dados experimentais, são apresentados na Figura 64 e na Figura 65.

| Degrau na vazão (l/min) | Ordem 1 | | | Ordem 2 | | | |
|----------------------------|---------|--------------|--------------------|---------|--------------|----------------------|----------------------|
| | Ganho | Tempo morto | Constante de tempo | Ganho | Tempo morto | Constante de tempo 1 | Constante de tempo 2 |
| | K | θ (s) | τ (s) | K | θ (s) | τ_1 (s) | τ_2 (s) |
| 4,0 | -1,083 | 1108,5 | 691,5 | -1,083 | 1405,2 | 207,1 | 113,9 |
| 6,0 | -0,722 | 933,5 | 551,0 | -0,722 | 1064,1 | 210,0 | 115,5 |
| 7,5 | -0,578 | 457,0 | 442,0 | -0,578 | 473,9 | 207,1 | 113,9 |
| 9,0 | -0,491 | 423,5 | 335,5 | -0,491 | 415,9 | 211,9 | 116,5 |
| 10,5 | -0,421 | 379,0 | 270,0 | -0,421 | 276,4 | 208,4 | 114,4 |
| 12,0 | -0,358 | 360,5 | 214,5 | -0,358 | 208,2 | 206,6 | 113,6 |
| 14,0 | -0,304 | 288,3 | 210,5 | -0,304 | 140,0 | 206,1 | 113,4 |
| 16,0 | -0,274 | 201,2 | 208,0 | -0,274 | 49,7 | 207,6 | 114,2 |

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos de 1^a ordem e 2^a ordem sobre amortecido, ambos com atraso de transporte θ .

Analizando-se os gráficos obtidos pode-se concluir que os modelos de 1^a ordem apresentam melhores resultados quanto à aproximação do sistema real em relação aos de 2^a ordem, para a faixa de vazão em estudo. Desta forma, a etapa de enxágue pode ser aproximada por um sistema de 1^a ordem com atraso de transporte.

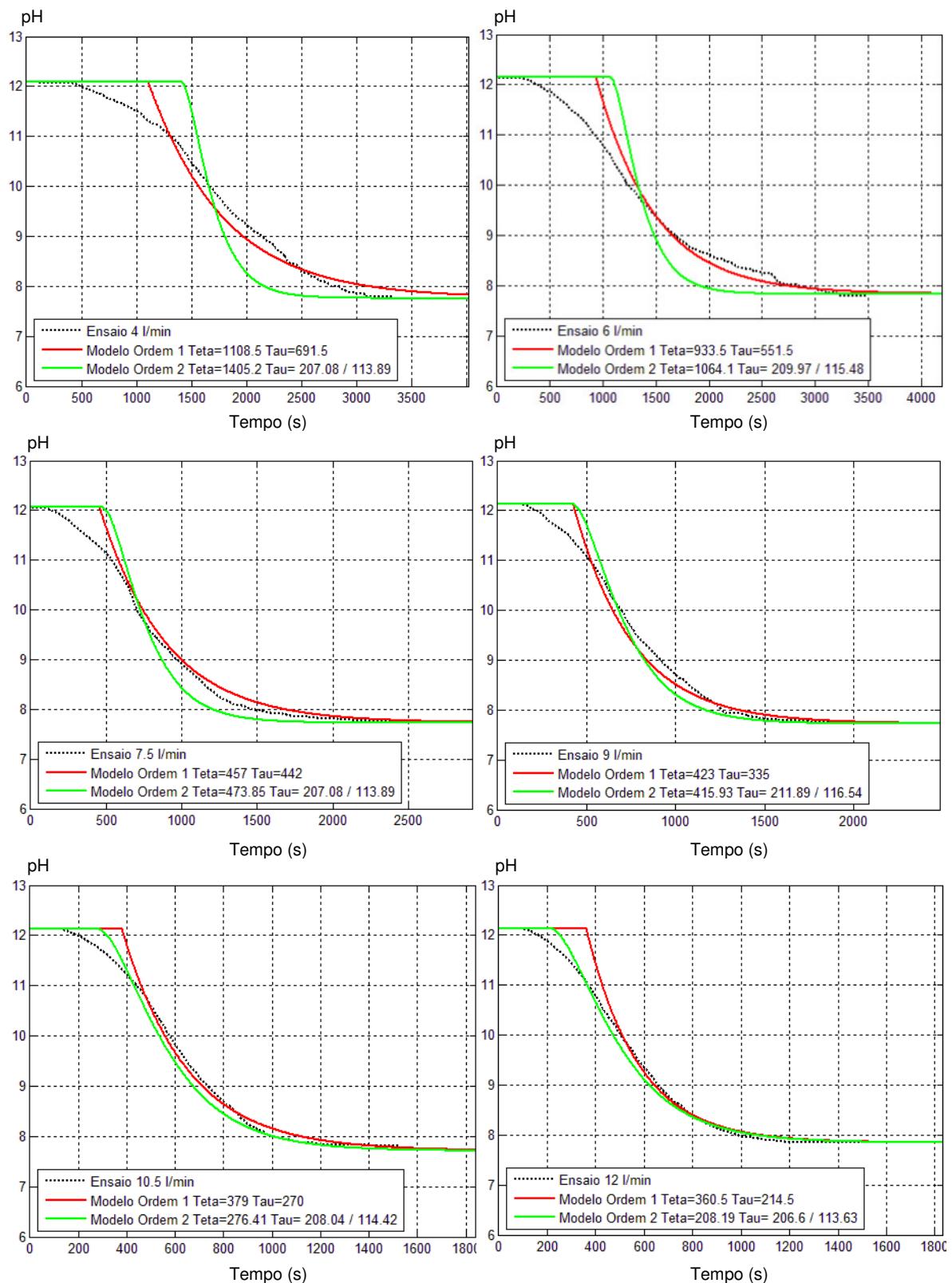


Figura 64 - Simulações dos sistemas aproximados do comportamento (pH x segundo) para ensaios de 4 l/min a 12 l/min.

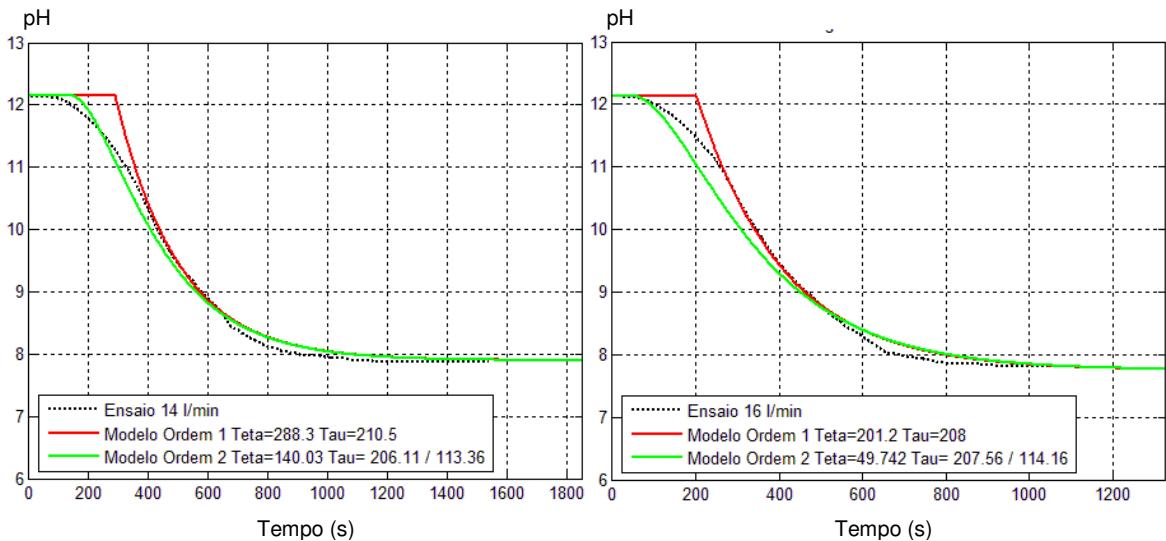


Figura 65 - Simulações dos sistemas aproximados do comportamento (pH x segundo) para ensaios de 14 l/min e 16 l/min.

Dada a condição inicial do processo, com pH em torno de 12,2 (solução detergente alcalina), a passagem de água (pH neutro) faz com que a variação do valor de pH seja unicamente decrescente, tendendo à neutralização (em torno de 7,8, para o tipo de água utilizada). Portanto, os modelos aqui obtidos determinam apenas tal comportamento (decrescente), podendo-se afirmar ainda que a variação do pH ($\Delta y = \Delta pH$) é constante e independente do tipo de vazão utilizada (sempre de 12,2 para 7,8). Dado que a obtenção da constante K de ganho do processo é feita segundo a expressão (2), ou seja, relacionando-se a amplitude da variação da saída (Δy) pela amplitude do degrau aplicado ($\Delta x = \Delta Q$), particularmente ao processo em estudo, a constante K é diferenciada nos ensaios apenas pelo valor de Δx (Δy é constante) e, desta forma, não fornece informações relevantes quanto ao comportamento do pH, visto que seu valor não é alterado ou controlado dentro de um ensaio. Logo, o que influencia a velocidade de mudança do pH é a constante de tempo do sistema e o tempo morto.

Quanto ao tempo morto (ou atraso de transporte) para o procedimento utilizado, este inclui o resíduo detergente final no volume compreendido pelos tubos do processo (cerca de 70 l), portanto, a inicialização da etapa de enxágue comprehende também em expulsar essa solução detergente existente no interior do trocador de calor com a passagem da água neutra.

Notando-se que um intervalo correspondente a 3,5 vezes a constante de tempo de um sistema de 1^a ordem faz com que esse sistema atinja cerca de 97% de seu valor final, quando submetido a um degrau na entrada, a partir do modelo identificado pode-se calcular aproximadamente o tempo necessário para atingir o pH neutro e terminar o processo: $t_{final} = \theta + 3,5\tau$, sendo θ o tempo morto e τ a constante de tempo do modelo obtido. O gráfico da Figura 66 mostra tal comportamento, comparando com os valores medidos experimentalmente. Nota-se que os parâmetros obtidos através do modelo identificado podem ser utilizados de maneira a se prever o tempo necessário para a etapa de enxágue.

Observa-se ainda, pelo gráfico da Figura 67, que as constantes de tempos τ dos modelos de 1^a ordem não variam linearmente com o valor da vazão empregada. Portanto, como salientado anteriormente, empregar vazões acima de um dado valor, o que é função do processo, não proporcionam melhoria no tempo de limpeza, e sim, contribuição com desperdício de água e energia.

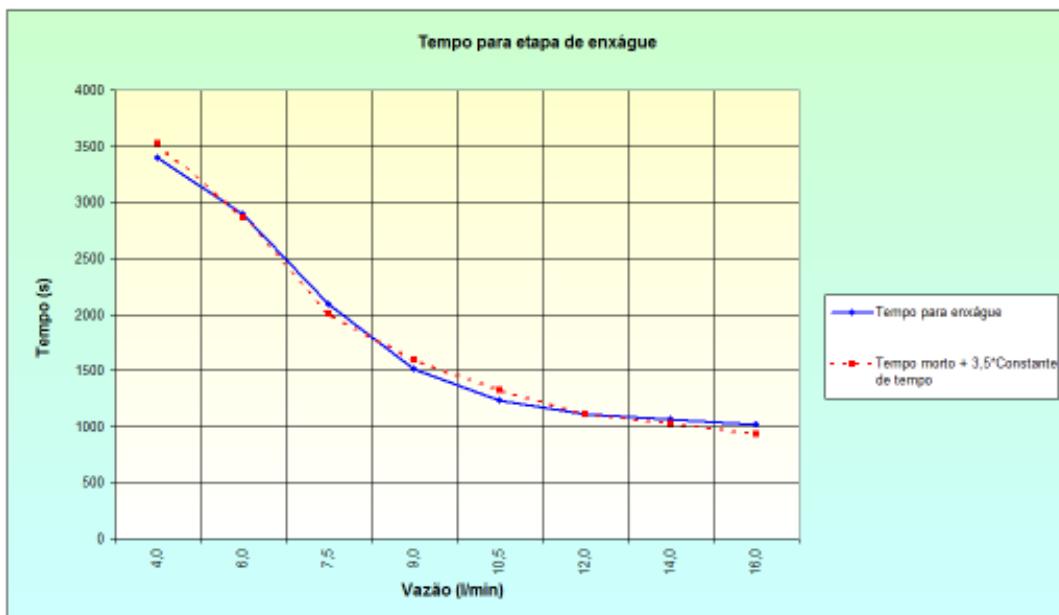


Figura 66 - Tempo medido para realização da etapa de enxágue comparado como previsto através dos dados dos modelos obtidos ($t_{final} = \theta + 3,5\tau$).

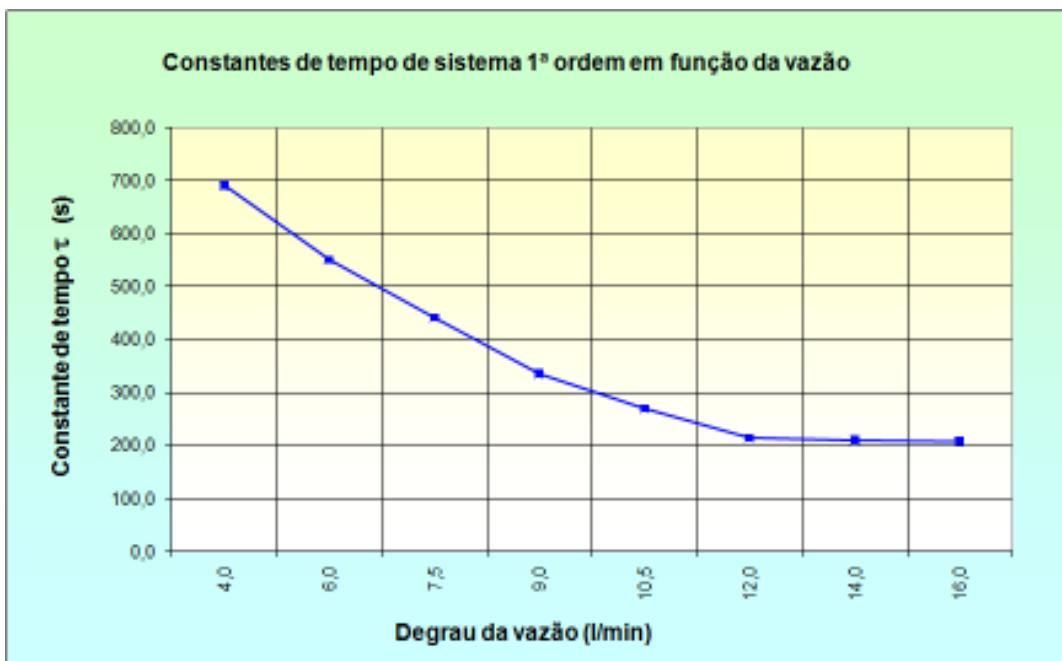


Figura 67 - Comportamento das constantes de tempos dos modelos de 1^a ordem em função da vazão.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho fundamentou-se no estudo da etapa de enxágue de um processo de sanitização cinética CIP em um trocador de calor de escala industrial. Para tal, foi necessário desenvolver a instrumentação da planta, levantar experimentalmente as características do comportamento da vazão e temperatura do fluído de processo e projetar controladores automáticos para tais grandezas. Os resultados obtidos foram compatíveis com os objetivos propostos neste trabalho. No que se refere à aplicação desenvolvida, tem-se um ganho em relação à literatura, visto que a mesma é realizada em ambiente real e não apenas em ambiente simulado ou de pequena escala, os quais são comumente empregados. Deve-se também salientar que o sistema desenvolvido pode ser utilizado em outros estudos que envolvam o mesmo trocador de calor, como por exemplo, aqueles relacionados às etapas de pré-sanitização ou sanitização do processo CIP, ou mesmo com eventuais produtos¹⁵ que necessitem ser processados em tal equipamento. Outra contribuição nesse sentido, é que os procedimentos adotados para o controle de tal equipamento podem ser estendidos a outros trocadores de calor, bastando efetuar ajustes das sintonias, utilizando os mesmos instrumentos e plataforma de controle.

Quanto ao estudo da variação do pH durante a etapa de enxágue, e devido ao fato do phmetro utilizado apresentar ruído em suas aquisições, a utilização de processo de filtragem por *wavelet* empregado apresentou um bom desempenho podendo, em estudos futuros, ser alterado para atuar em tempo real e implementado de maneira automática na plataforma computacional desenvolvida.

Através dos ensaios preliminares realizados, pôde-se verificar que o comportamento do pH na etapa de enxágue não sofre influência relevante quanto a execução ou não de sujidade com leite proveniente da etapa anterior (pré-sanitização), podendo seu estudo ser realizado sem a necessidade de incrustação com leite, diminuindo assim custos pelo consumo de matéria prima, água e energia. Também, através dos estudos realizados, notou-se que a temperatura não é relevante para o aumento da velocidade de diminuição do valor do pH da etapa de enxágue na faixa de aplicação abordada (50°C a 80°C e 4 l/min a 16 l/min) e comumente utilizada. Tal fato é importante, pois com a diminuição da temperatura, ocorre

¹⁵ Produto no trocador de calor deve ser entendido como um fluído de processo específico a ser processado, por exemplo, massa de tomate, a qual já fora utilizada no equipamento utilizado para o estudo.

menor consumo de energia. Portanto, modelos simplificados para o comportamento do pH na etapa de enxágue apresentam baixas sensibilidades à mudanças de temperatura e podem ser caracterizados utilizando apenas a vazão. Sob esse aspecto, modelos de primeira ordem com atraso de transporte foram obtidos para a etapa em estudo e, através dos mesmos, pôde-se determinar uma estimativa do tempo necessário para o término da etapa de enxágue (pH próximo do valor neutro). Os valores de tempo obtidos pela modelagem (tempo morto + 3,5 vezes a constante de tempo) forneceram resultados próximos aos obtidos experimentalmente, validando os resultados do modelo quanto ao decréscimo do pH na etapa de enxágue. Através dos modelos obtidos e dos ensaios de vazão realizados, mostra-se também que a variação do pH na etapa em estudo não apresenta linearidade com a variação da vazão, apresentando comportamento assintótico. Logo, a partir de um determinado valor de vazão não ocorre diminuição do tempo necessário para a conclusão da etapa de enxágue, levando apenas a um maior consumo de energia e água.

Em trabalhos futuros, além da possibilidade de estudar outras etapas do processo CIP utilizando o sistema de instrumentação desenvolvido, conforme já citado, pretende-se estudar métodos para otimização automática da etapa de enxágue, utilizando os resultados aqui obtidos, visando encontrar a melhor solução *tempo versus vazão* para um dado sistema de limpeza CIP. Outro parâmetro a ser estudado seria a influência da concentração de detergente (solução de NaOH) utilizado no processo. Neste trabalho adotou-se valor comumente utilizado na indústria, mas variações em torno deste valor nominal devem ser avaliadas. Quanto à instrumentação proposta, uma melhoria seria a utilização de um condutivímetro no lugar do phmetro. Tal instrumento possui melhor desempenho para processos dinâmicos, quanto à turbulência, e analíticos no processo de avaliação da pureza da água resultante envolvida, quando comparado ao phmetro.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB Power and productivity for a better world. Disponível em:
<http://www.abb.com/product/seitp322/5c818ed6994c7e4bc1256fc0002c2167.aspx?tabKey=2&gid=TEMP.USINY001ACS143-2K1-1-U&cid=9AAC113415>. Acesso em 29 jun. 2010.
- AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- ANDRADE, N. J.; MACEDO, J. A. B. **Higienização na indústria de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 1996.
- ASCII TABLE. **American Standard Code for Information Interchange**. Disponível em:
<http://www.ascitable.com/>. Acesso em 17 jul. 2010.
- ASSELT, V. A. J., VISSERS, M.M.M., SMIT, F., DE JONG, P. **In-line control of fouling. Proceedings of heat exchanger fouling and cleaning - challenges and opportunities**. Kloster Irsee, Germany; June 5-10: New York U.S.A.; Engineering Conferences International, 2005.
- ÅSTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. North Carolina, USA: ISA, 1995.
- BANSAL, B.; CHEN, X. D. **A critical review of milk fouling in heat exchangers**. Comprehensive reviews in food science and food safety. v. 5, n. 2, p. 27-33, abr. 2006.
- BARNARD, S. E.; IVKOVICH, M.; CAULEER, P. **Processing procedures and sanitation practices to extend the keeping quality of fluid milk**. Dairy, food and environmental sanitation. v. 12, n. 2, p. 66-68, fev. 1992.
- BELMAR-BEINY, M.T. et al. **The effect of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling**. Journal of Food Engineering. v. 19, n. 2, p. 119-139, 1993.
- BEUF, M. et al. **Fouling and cleaning of modified stainless steel plate heat exchangers processing milk products**. In: Watkinson P.; Muller-Steinhagen, H.; Malayeri, R. (editors). ECI Conference on heat exchanger fouling and cleaning fundamentals and applications, Santa Fe, New Mexico. v.12, p.66-68, 2003.
- BOLZAN, M. J. A. **Transformada em ondeleta: uma necessidade**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, no. 4. São Paulo, SP, 2006.
- BORLAND, Software Corporation. Disponível em:
<http://www.borland.com.br/products/delphi/>. Acesso em 28 set. 2010.
- BRACEWELL, R. **The Fourier Transform & Its Applications**. 3. Ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

BREMER, P. J. et al. **Laboratory scale Clean-In-Place (CIP) studies on the effectiveness of different caustic and acid wash steps on the removal of dairy biofilms.** Elsevier Science & International Journal of Food Microbiology, University of Otago, New Zealand, jul. 2005.

BREMER, H. LTDA. **Flamo** Tubular. Disponível em:
<http://www.bremer.com.br/novo/index.php?pg=hbfcc>. Acesso em 09 set. 2010.

BYLUND, G. **Dairy processing handbook.** Lund, Sweden: Tetra Pak Processing Systems AB, 1995.

CAMPOS, M.C.M.M; TEIXEIRA, H.C.G. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais.** São Paulo, SP: Ed. Edgard Blucher. 1 ed., 2007.

DIAS, M. H. C. **Análise da supressão de ruído por decomposição wavelet como técnica complementar de processamento.** Rio de Janeiro, RJ, 2003. Tese de doutorado. Certificação digital 0016247/CA. PUC RIO - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

ENGINSTREL Engematic Instrumentação Ltda. Disponível em:
<http://www.enginstrelengematic.com.br/boletins/Boletim%20621IP.pdf>. Acesso em 29 jun. 2010.

FLUXOTROL SpA. Disponível em: <<http://www.tecnodistribuzione.it/Fluxotrol25.pdf>>. Acesso em 18 ago. 2010.

FORSYTHE, S. J.; HAYES, P. R. **Higiene de los alimentos, microbiología y HACCP.** 2. ed. Zaragoza: Editorial Acribia, 2002.

FRYER, P. J.; CHRISTIAN, G. K.; LIU, W. **How hygiene happens: physics and chemistry of cleaning.** International Journal of Dairy Technology, v. 59, n. 2, p. 76-84, mai. 2006.

GALLOT, L. T. **Cleaning kinetics modeling of holding tubes fouled during milk pasteurization.** Journal of Food Process Engineering, v. 7, p. 123-142, 1984.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos.** 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2005.

GARCIA, C. **Introdução ao Controle de Processos Industriais.** São Caetano do Sul, SP: CEUN-EEM Pós graduação, 2007. Apostila.

GEDRAITE, R.; KUNIGK, L.; RIBEIRO, S.; MELERO JR., V.; VASCONCELOS, F.; SISLIAN, R. **Experimental investigation about the milk protein based deposit removal kinetics.** World congress on communication and arts, WCCA, Guimarães – Portugal, 2010.

GIBSON, H. et al. **Effectiveness of cleaning techniques used in the food industry in terms of the removal of bacterial biofilms.** Journal of Applied Microbiology, v. 87, n. 1, p. 41-48, 1999.

GIESE, J. H. **Sanitation: the key to food safety and public health.** Food Technology, v. 45, n. 12, p. 74-80, dez. 1991.

GÖNDER, Z.B. et al. **Optimization of filtration conditions for CIP wastewater treatment by nanofiltration process using Taguchi approach.** Elsevier Science & Technology Books, Istanbul University, Turkey, out. 2009.

HALL, C. W.; FAVRA, A. W.; TRIPPER, A. L. **Encyclopedia of Food Engineering.** U.S.A.: Avi Pub Co, 1971.

HANGOS, K. M.; CAMERON, I. **Process Modelling and Model Analysis.** San Diego, California, USA: Academic Press, 1. ed. , jun. 2001.

HARROLD, Dave. **Automate CIP, track pipe status.** Control Engineering, dez. 2000.

HAYKIN, S. **Redes Neurais – Princípios e Prática.** 2.ed. Porto Alegre: Ed. Artmed Bookman, 1999.

HOBBS, B. C.; ROBERTS, D. **Higiene y toxicología de los alimentos.** 3. ed. Zaragoza: Editorial Acribia, 1997.

HONER, C. **Sanitation: front and center.** Dairy Field, p. 16-23, mar. 1992.

INCON Eletrônica Ltda. Disponível em:
<http://www.incon.com.br/index.php?sec=produtos&funcao=detalhes&id=59>. Acesso em 29 jun. 2010.

INSTRUTEMP Instrumentos de Medição Ltda. Disponível em
<http://www.instrutemp.com.br/instrutemp/interface/Default.asp?>. Acesso em 07 mai. 2010.

JEURNINK, T. J. M.; BRINKMAN, D. W. **The cleaning of heat exchangers and evaporators after processing milk or whey.** Dairy Journal, Ireland, v. 4, p. 347-368, 1994.

JONG, D. P. **Impact and control of fouling in milk processing.** Trends in Food Science & Technology, v. 8, n. 12, p. 401-405, dez. 1997.

JUN, S; PURI, V. M. **Fouling models for heat exchangers in dairy processing: a review.** Journal of food process engineering, v. 28, n. 1, p.1-34, 2005.

KHS - Ziemann Lies. **Sistema ACIP.** Catálogo técnico.

KUNIGK L. **Ação do ácido peracético sobre microrganismos contaminantes do processo cervejeiro.** São Paulo – SP: Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, 1998. Doutorado.

LALANDE, M.; TISSIER, J.; CORRIEU, G. **Fouling of a plate heat exchanger used in ultra-high-temperature sterilization of milk.** Journal of Dairy Research, v. 51, p. 557-568, 1984.

LEITÃO, M. F. F. **Limpeza e desinfecção na indústria de alimentos.** Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 43, p. 1-35, set. 1975.

LJUNG, L.; **System Identification. Theory for the User.** 2. ed. Linkoping University, Sweden. Prentice Hall, 1999.

MALANGE, F. C. V. **Rede neuro-fuzzy-wavelet para detecção e classificação de anomalias de tensão em sistemas elétricos de potência.** Ilha Solteira, SP, 2010. Tese de doutorado. UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Disponível em: <http://www.dee.feis.unesp.br/pos/teses/arquivos/065-tese_fernando_malange.pdf>. Acesso em 18 fev. 2011.

MARRIOT, N. G. **Principles of Food Sanitation.** Springer Science + Business Media Inc, New York-U.S.A, 1994.

MARTIN, P. A. **Modelagem e controle de um trocador de calor feixe tubular.** São Paulo, SP, 2006. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-27032006-211526/>>. Acesso em 27 set. 2010.

MATWORKS. **MatLab Simulink.** Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/>>. Acesso em 28 set. 2010.

METROVAL Controle de Fluídos Ltda. **Single Case Oval Gear PD Meter.** Catálogo, rev. 02, fev. 2007.

METROVAL Controle de Fluídos Ltda. Disponível em:
<<http://www.metroval.com.br/index.php?menu=1>>. Acesso em 20 jun. 2010.

MICRONAL AS, Medição de pH. Disponível em:
<http://www.micronal.com.br/produtos/medidorph_B474.htm>. Acesso em 07 mai. 2010.

MIDDLEMISS, N. E.; NUNES, C. A.; SORENSEN, J. E.; PAQUETTE, G. **Effect of a water rinse and a detergent wash on milkfat and milk protein soils.** Journal of Food Protection, v. 48, p. 257-260, mar. 1985.

MILLER, J. R. MILLER, JA; AM LOPEZ; CL SMITH; P W. MURRILL. **A comparison of controller tuning techniques.** Control Engineering, v.14, n. 12, p. 72, dez. 1967.

MITTELMAN, M. W. **Symposium: Biofims: development and control.** Journal of Dairy Science, v. 81, p. 2760-2764, 1998.

MROZEK, H. **Detergency and disinfection.** Journal of the Society of Dairy Technology, v. 38, n. 4, p. 119-121, out. 1985.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Products & Services. NI LabVIEW. 2010.** Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/>>. Acesso em 27 set. 2010.

OGATA, K. B. **Engenharia de Controle Moderno.** Rio de Janeiro, RJ: Prentice-Hall do Brasil, 1998.

PASSOS, M. H. C. R. **Estudo da dispersão de depósitos incrustantes obtidos em pasteurizadores de leite por detergentes ácidos e alcalinos: influência do pH, tempo e**

temperatura de reação. Campinas – SP: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 1992. Mestrado.

PARKAR, S. G.; FLINT, S. H.; BROOKS, J. D. **Evaluation of the effect of cleaning regimes on biofilms of thermophilic bacilli on stainless steel.** Journal of Applied Microbiology, v. 96, p. 110-116, 2003.

PIFER, A. C.; CAMPOS, C. F. P. S.; CAMPOS, A. L. P. S. **Aplicação de wavelets para remoção de ruídos em sinais unidimensionais.** Rio Grande do Norte. Revista Holos, v. 1, p. 131-140, 2008.

PINTO, L. A.; GALVÃO, R. K. H. **Combinação de modelos obtidos por regressão no domínio wavelet.** Anais do CNMAC – Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, v.2, p. 761-767, 2009.

REED, G. H. J. **The cleaning process - some definitions of terms.** Dairy, Food and Environmental Sanitation, v. 12, p. 612-613, set. 1992.

REINEMANN, D. J.; RABOTSKI, E. **Interaction of chemical, thermal and physical actions on the removal of bacteria from milk contact surfaces.** In: INTERNATIONAL WINTER MEETING THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, Chicago. Anais: Chicago: ASAE, 1993, Paper Nº 933536.

RESTO, W. et al. **Cleaning validation 2: Development and validation of an ion chromatographic method for the detection of traces of CIP-100 detergent.** Elsevier Science & Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, CAYEY, USA, jan. 2007.

ROBUSCHI, SpA. **Pompe.** Disponível em:<<http://www.directindustry.es/prod/robuschi-spa/bomba-de-vacio-de-anillo-liquido-23555-374491.html>>. Acesso em 02 ago. 2010.

ROCKWELL AUTOMATION. **Programmable Logic Controller - PLC.** Disponível em: <http://br.rockwellautomation.com/applications/gs/la/gsbr.nsf/pages/Home_Page_EN>. Acesso em 09 ago. 2010.

SBCTA - SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS. **Manual de Higiene e Sanitização para as Empresas de Alimentos.** Campinas, SP, 2000.

SCHMIDT, R. H. **Basic elements of equipment cleaning and sanitizing in food processing and handling operations.** Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 1997.

SMITH, C. L. **Digital computer process control.** Scranton, PA: Intext Educational Publisher, 1972.

SUNDARESAN, K. R.; KRISHNASWAMY. P. R. **Estimation of time delay, time constant parameters in time, frequency and Laplace domains.** The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 56, n. 2, p. 257-62, abr. 1978.

TECNISIS - Técnicas de Sistemas Industriais, Ltda. Disponível em: <<http://www.tecnisis.pt/produtos/list.html?categoria=1>>. Acesso em 12 jun. 2010.

TETRAPIK. Pasteurização. Disponível em:

<http://www.tetrapak.com/br/produtos_e_servicos/processamento/bebidas/pasteurizacao/Page/default.aspx>. Acesso em 02 fev. 2011.

TURNER, D. W. Hygiene in the dairy industry. Dairy Industries International, v. 47, p. 11-17, jul. 1982.

VETTORI – MANGHI & C. Instruction Book For Horizontal Sterilizer Pasteurizern. Mechanical Constructions. Parma. Italy. s.d.

WAVELET. Wavelet Toolbox - User's Guide. Disponível em:

<http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/wavelet/wavelet_ug.pdf>. Acesso em 15 fev. 2011.

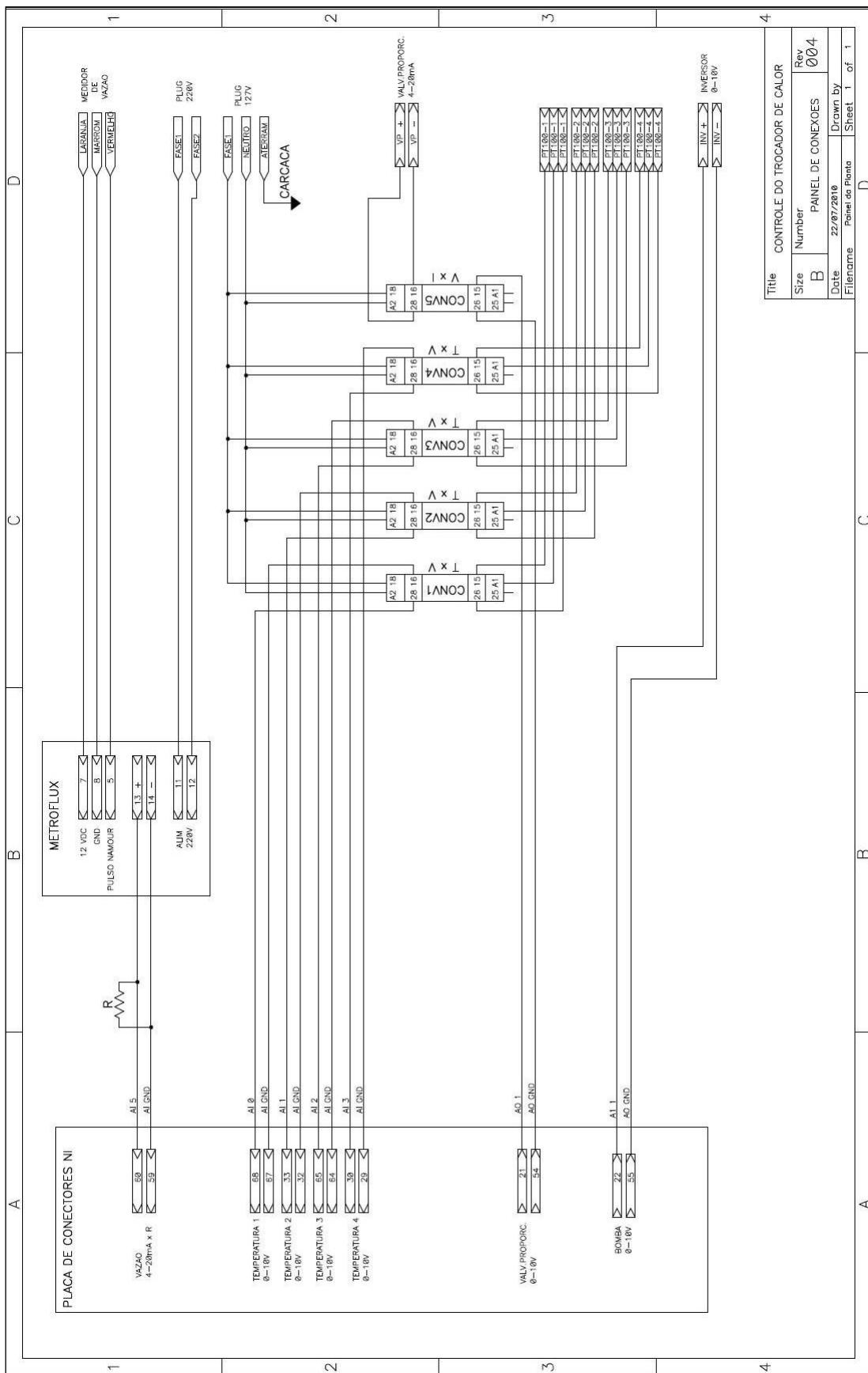
WEATHEFORD. Pump and Fluid Systems. Disponível em:

<<http://www.weatherford.com/Products/Production/PumpandFluidSystems>>. Acesso em 09 set. 2010.

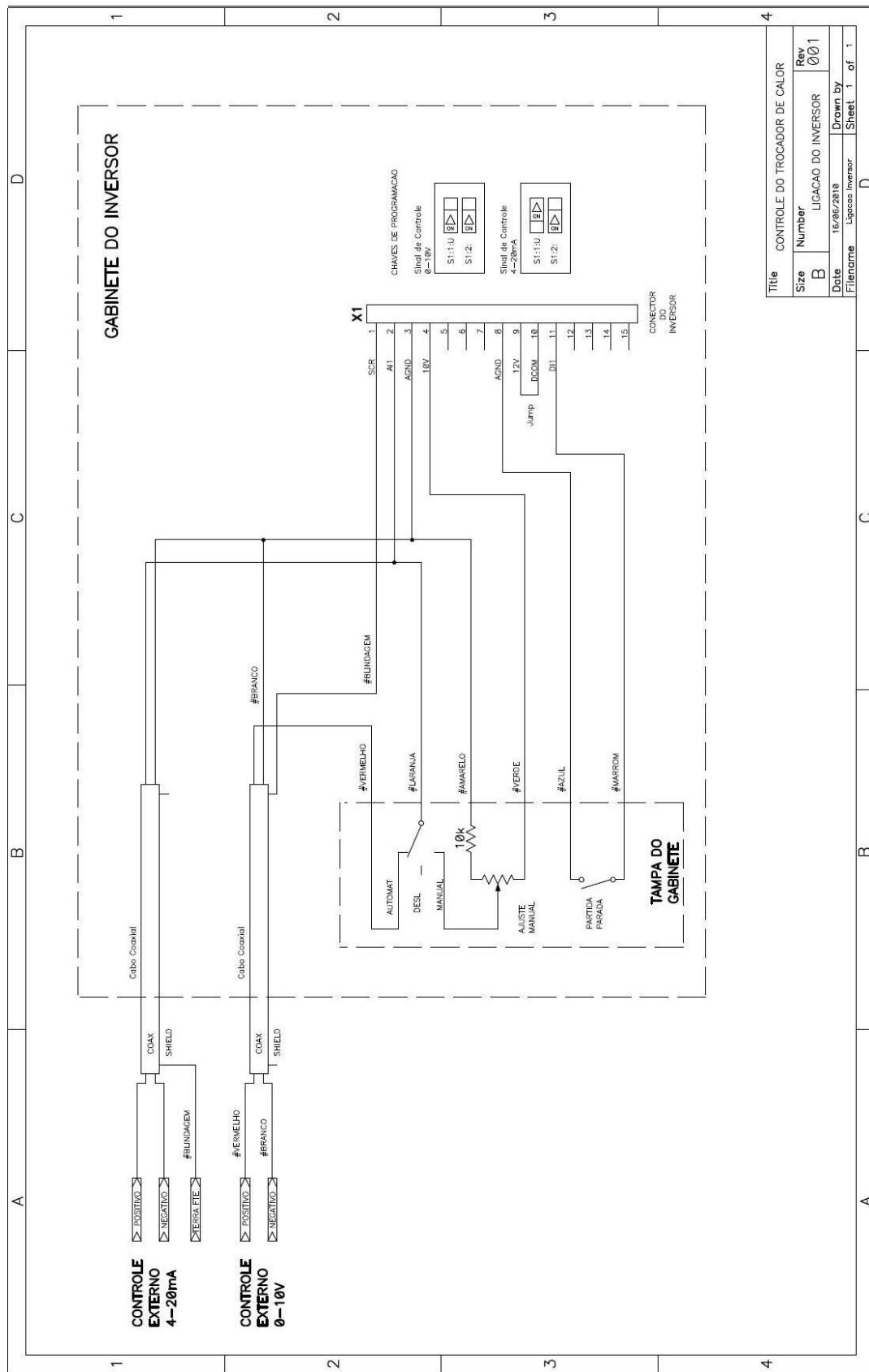
ZHU, Y. Multivariable System Identification for Process Control. 1. ed. Eindhoven: Elsevier Science & Technology Books, 2001.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. Transactions of the ASME, v. 64, n. 11, nov. 1942.

APÊNDICE A - Esquema elétrico das entradas e saídas dos periféricos



APÊNDICE B - Esquema elétrico das conexões do inversor de frequência



APÊNDICE C - Parâmetros teóricos para sintonia dos controladores

CONSTANTES DE ENTRADA: parâmetros do processo

| Parâmetros do processo | | Vazão | Temper. |
|------------------------|----------|-------|---------|
| Ganho do processo | K | 1,30 | 7,22 |
| Constante de tempo | τ | 14,0 | 378 |
| Tempo morto | θ | 2,00 | 78,0 |

Cálculos de sintonias para controladores da VAZÃO

| | Kp | TI | TD |
|---|-------|-------|-------|
| Método: Sintonia Ziegler & Nichols | | | |
| P | 5,385 | --- | --- |
| PI | 4,846 | 0,111 | --- |
| PID | 6,462 | 0,067 | 0,017 |
| Método: CHR - Critério 20% de sobrevalor | | | |
| P | 3,769 | --- | --- |
| PI | 3,231 | 0,233 | --- |
| PID | 5,115 | 0,321 | 0,016 |
| Método: ITAE [Lopez et al., 1967] | | | |
| PI | 0,799 | 0,092 | --- |
| PID | 6,591 | 0,066 | 0,013 |

| | Kp | TI | TD |
|--|-------|-------|-------|
| Método: CHR - Critério sem sobrevalor | | | |
| P | 1,615 | --- | --- |
| PI | 3,231 | 0,133 | --- |
| PID | 5,115 | 0,079 | 0,014 |
| Método: Cohen & Coon | | | |
| P | 5,815 | --- | --- |
| PI | 4,910 | 0,022 | --- |
| PID | 7,462 | 0,079 | 0,012 |
| Método: ITAE [Rovira et al., 1969] | | | |
| PI | 2,680 | 0,101 | --- |
| PID | 3,881 | 0,220 | 0,012 |

Cálculos de sintonias para controladores da TEMPERATURA

| | Kp | TI | TD |
|---|-------|-------|-------|
| Método: Sintonia Ziegler & Nichols | | | |
| P | 0,673 | --- | --- |
| PI | 0,605 | 4,329 | --- |
| PID | 0,807 | 2,600 | 0,650 |
| Método: CHR - Critério 20% de sobrevalor | | | |
| P | 0,471 | --- | --- |
| PI | 0,404 | 6,313 | --- |
| PID | 0,639 | 8,680 | 0,615 |
| Método: ITAE [Lopez et al., 1967] | | | |
| PI | 0,139 | 3,198 | --- |
| PID | 0,840 | 2,336 | 0,499 |

| | Kp | TI | TD |
|--|-------|-------|-------|
| Método: CHR - Critério sem sobrevalor | | | |
| P | 0,202 | --- | --- |
| PI | 0,404 | 5,200 | --- |
| PID | 0,639 | 3,088 | 0,547 |
| Método: Cohen & Coon | | | |
| P | 0,741 | --- | --- |
| PI | 0,617 | 0,856 | --- |
| PID | 0,943 | 2,997 | 0,464 |
| Método: ITAE [Rovira et al., 1969] | | | |
| PI | 0,345 | 4,722 | --- |
| PID | 0,512 | 6,286 | 0,448 |

APÊNDICE D - Painel frontal e diagrama em blocos do programa para coleta dos dados em plataforma LabVIEW®

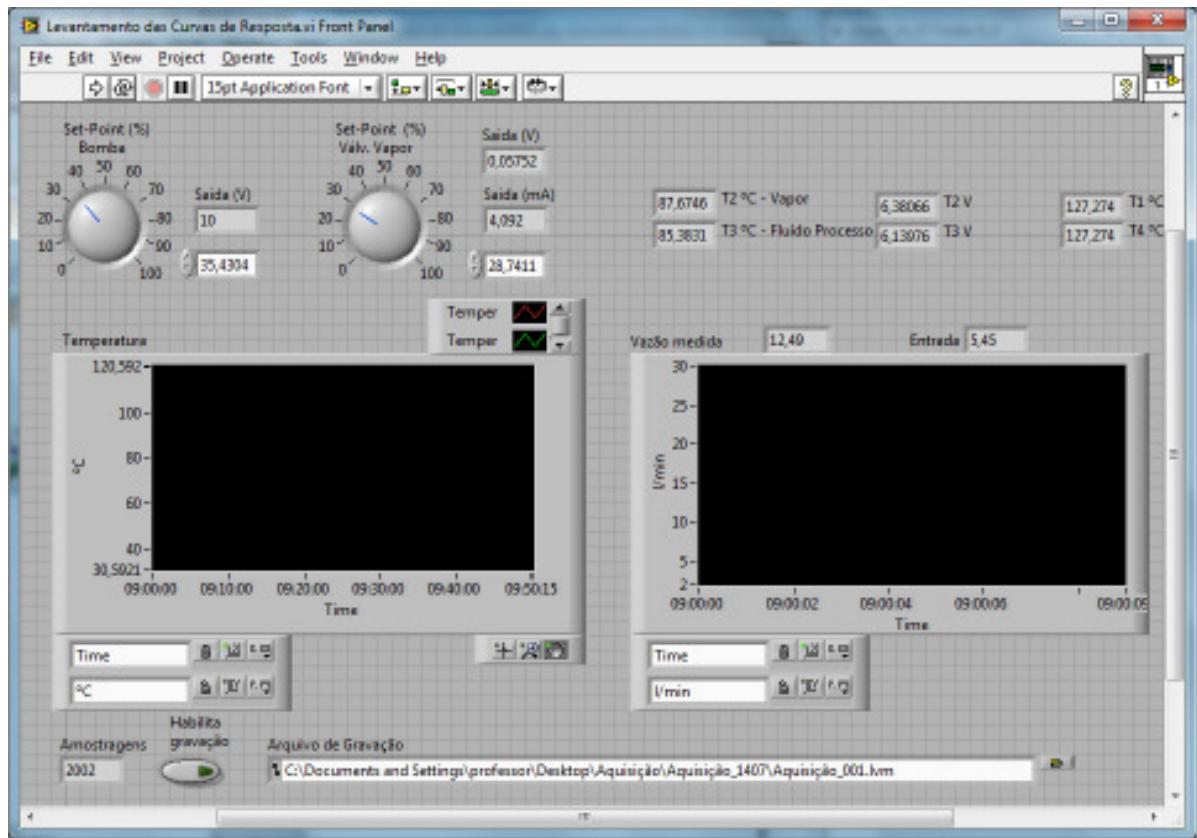


Figura D.1 - Painel Frontal do programa para coleta de dados em LabVIEW®.

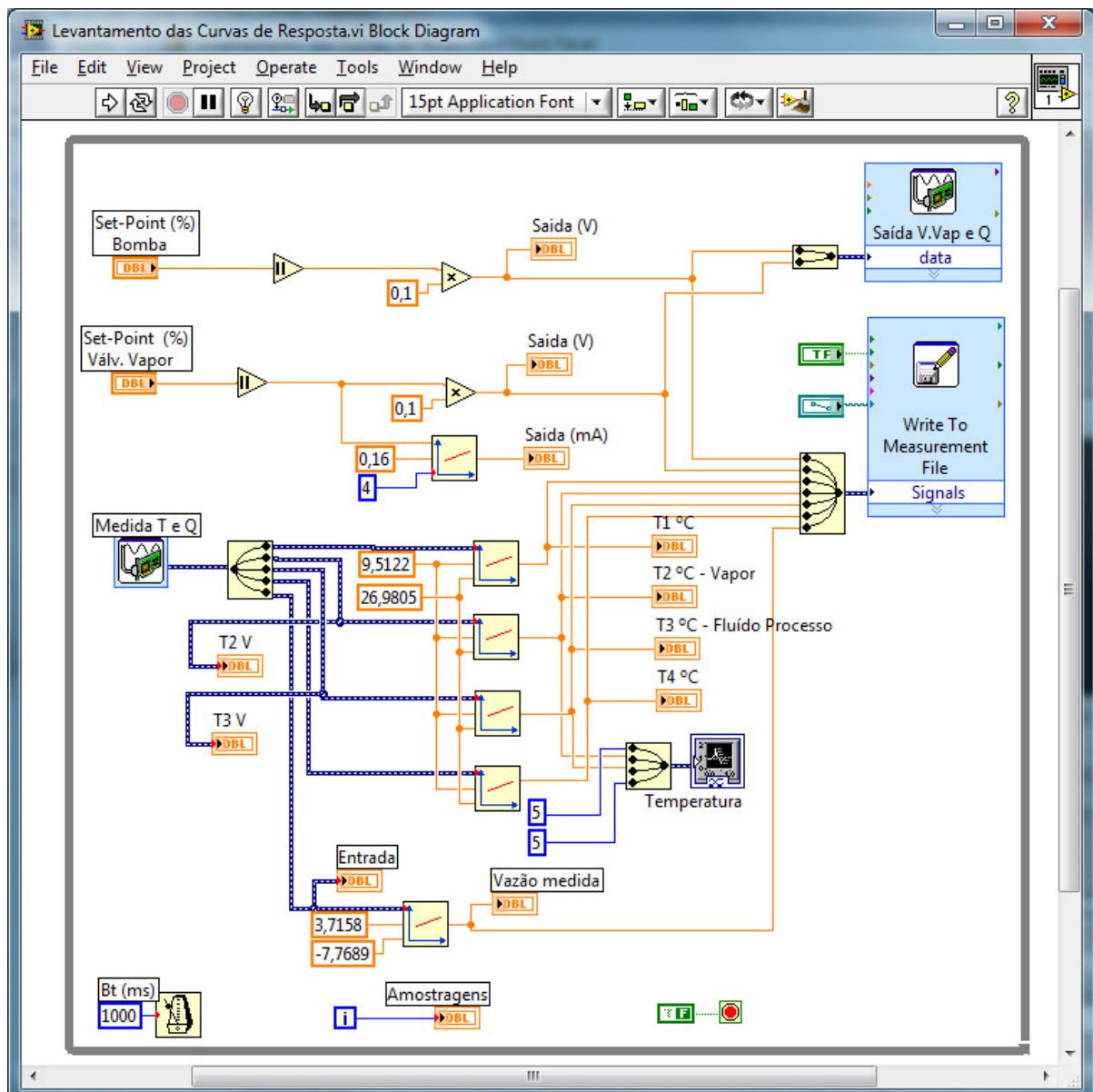


Figura D.2 - Diagrama em blocos do programa para coleta de dados em LabVIEW®.

APÊNDICE E – Painel frontal e diagrama em blocos do programa dos controladores e obtenção de valores de pH em plataforma LabVIEW®

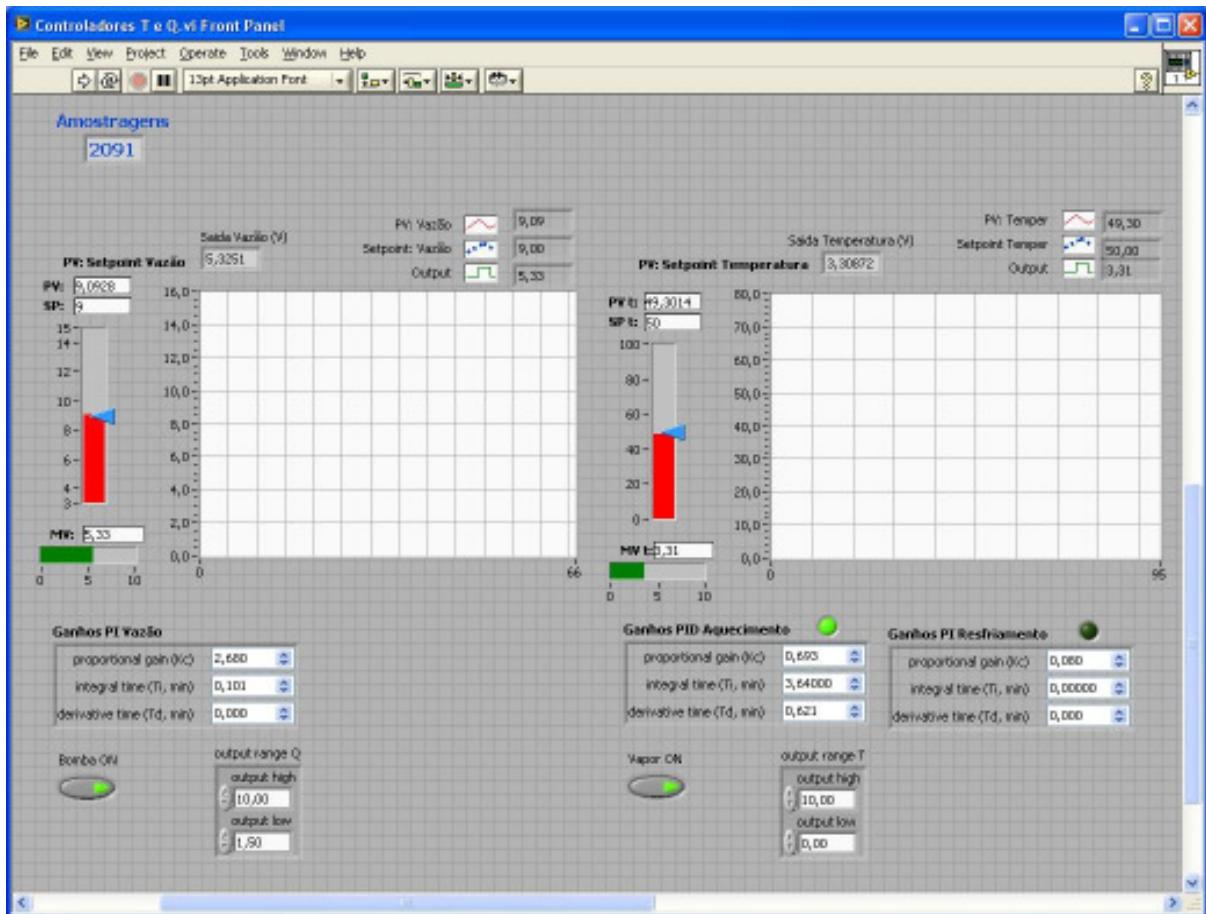


Figura E.1 - Painel frontal dos controladores: aquisição da vazão, temperaturas e pH usando LabVIEW®.

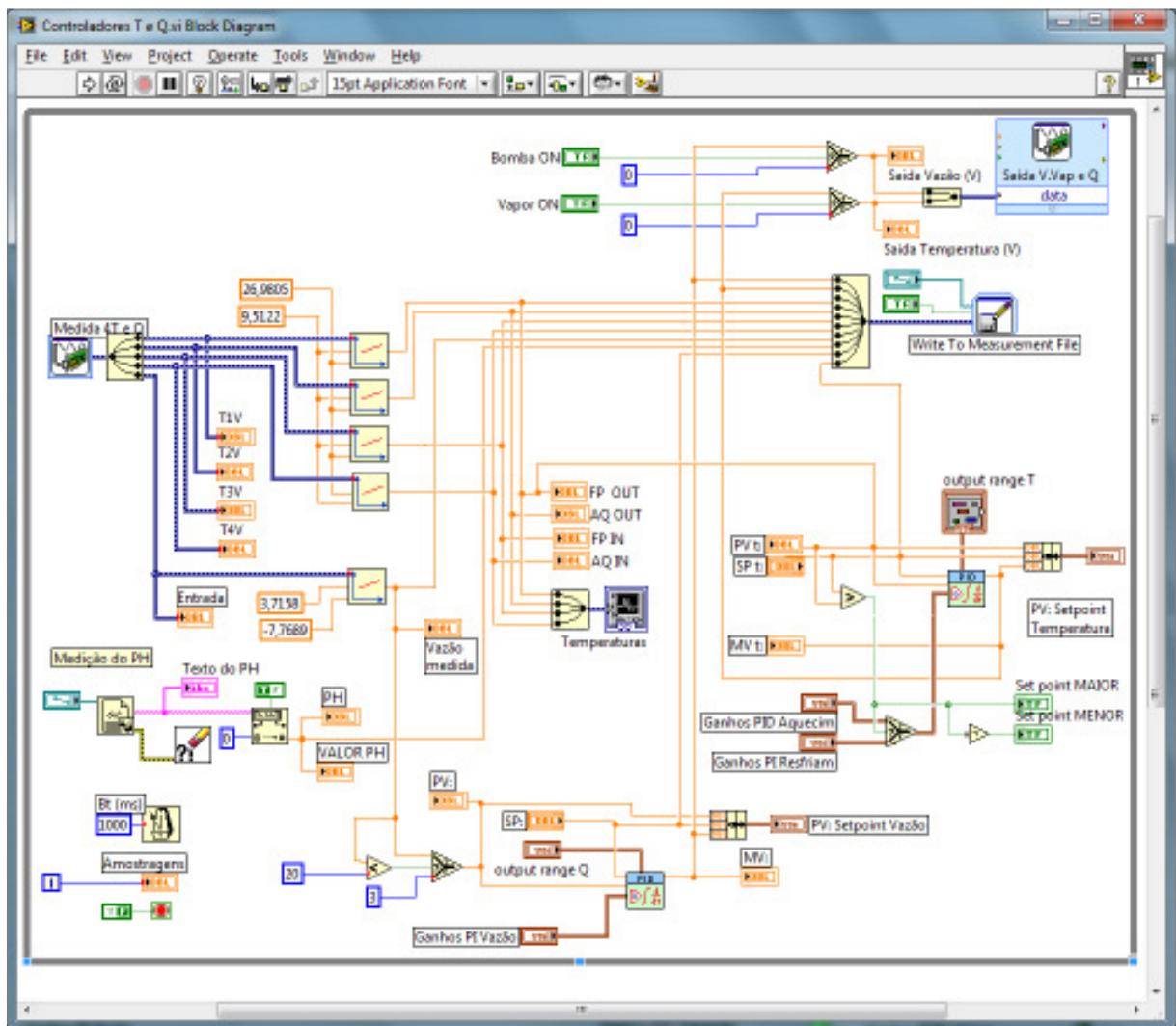


Figura E.2 - Diagrama em blocos dos controladores: aquisição da vazão, temperaturas e pH usando LabVIEW®.

**APÊNDICE F – Programa em MATLAB® para obtenção do modelo de 2^a ordem /
Modelo em SIMULINK para simulação dos modelos de 1^a e 2^a ordem**

```
%*****  
% SIMULAÇÃO DOS ENSAIOS DE VAZÃO  
% Ordem 1 com tempo morto  
% Ordem 2 sobreamortecido com tempo morto  
%  
% Valdir Melero Junior / 2011  
%*****  
  
clear all;  
close all;  
  
Vazao= 16; % Define o tipo de ensaio da VAZÃO a ser simulado  
  
%% Carrega o ensaio e as constantes do sistema de 1a ordem  
switch Vazao  
    case 4  
        Ensaio= dlmread ('Ensaio_040.txt');  
        K = -1.083; O1_Teta= 1108.5; O1_Tau = 691.5;  
    case 6  
        Ensaio= dlmread ('Ensaio_060.txt');  
        K = -0.722; O1_Teta = 933.5; O1_Tau = 551.0;  
    case 7.5  
        Ensaio= dlmread ('Ensaio_075.txt');  
        K = -0.578; O1_Teta = 457; O1_Tau = 422;  
    case 9  
        Ensaio= dlmread ('Ensaio_090.txt');  
        K = -0.491; O1_Teta = 423,5; O1_Tau = 335,5;  
    case 10.5  
        Ensaio= dlmread ('Ensaio_105.txt');  
        K = -0.421; O1_Teta = 379,5; O1_Tau = 270,5;  
    case 12  
        Ensaio= dlmread ('Ensaio_120.txt');  
        K = -0.358; O1_Teta = 360.5; O1_Tau = 214.5;  
    case 14  
        Ensaio= dlmread ('Ensaio_140.txt');  
        K = -0.304; O1_Teta = 288.3; O1_Tau = 210.5;  
    case 16  
        Ensaio= dlmread ('Ensaio_160.txt');  
        K = -0.274; O1_Teta = 201; O1_Tau = 208.0;  
  
end  
  
%% Separa a matriz de entrada em duas: função yE e tempo tE  
Tamanho= size(Ensaio,1); %Quantidade de amostragens do ensaio  
TimeSimul=Tamanho*1.2; %Define o tempo total de simulação  
yE= Ensaio (1:Tamanho,2);  
tE= Ensaio (1:Tamanho,1);  
  
yEMax= max(yE); %Determina os valores máximo e mínimo de y  
yEMin= min(yE); %Variação da amplitude de y  
yEDelta= yEMax-yEMin;  
  
%% Obtém o sistema de 2a ORDEM  
for i=1:Tamanho, %Normaliza y de 0 a 1 com boca para baixo
```

```

yNorm(i)=yE(i)-yEMin;           %Retira o deslocamento (menor valor em zero)
yNorm(i)=yNorm(i)/yEDelta;      %Normaliza para amplitude 1
yNorm(i)=1-yNorm(i);           %Inverte, boca para baixo
end

%Cálculo da área por integração: m1=1-y(t)
Area=0;                         %Inicia condição
DT=tE(2)-tE(1);                %Intervalo entre tempos de amostragem
for i=1:Tamanho,
    Area=Area+(1-yNorm(i))*DT;   %Somatória para cálculo da área
end

%Obtem o ponto de inflexão
for i=2:Tamanho-1,
    DI(i)=yNorm(i+1)-yNorm(i);
    if DI(i)>DI(i-1),
        Y0=yNorm(i);
        T0=tE(i);
        DY=DI(i);
    end
end
Mi=(DY/DT);                     %Inclinação da reta tangente

%Projeção no eixo de tempo
Y= Vazao;                       %Degrau da vazão/Amplitude de y unitária
TM=((Y-Y0)/Mi)+T0;              %Parâmetro lâmbda
Lambda=(TM-Area)*Mi;

Eta=[0.01:0.01:1];               %Eta estimado
Aux=log(Eta);
Qsi=Aux./(Eta-1);
Lambda=Qsi.*exp(-Qsi);
Eta2=0.55;                        %Eta 2 estimado

%Cálculo das constantes do sistema de 2a ordem
O2_Tau1=(Eta2^(Eta2/(1-Eta2))/Mi);
O2_Tau2=(Eta2^(1/(1-Eta2))/Mi);
O2_Teta=Area-O2_Tau1-O2_Tau2;

%% Simulação dos modelos Ordem 1 e 2 pelo Simulink
sim ('Mod_O1_O2',TimeSimul);

%% Gráfico do modelo original com ordens 1 e 2 não normalizado
VazaoStr= num2str(Vazao,5);      % Prepara os strings para legendas
TauStr = num2str(O1_Tau,5);
TetaStr = num2str(O1_Teta,5);
Tau1Str = num2str(O2_Tau1,5);
Tau2Str = num2str(O2_Tau2,5);
Teta2Str= num2str(O2_Teta,5);

figure(1);
plot (tE,yE,':k','LineWidth',2);
hold;
plot (t,Modelo_01,'-r','LineWidth',2);
plot (t,Modelo_02,'-g','LineWidth',2);

Str1= ['Ensaio ' VazaoStr ' l/min'];
Str2= ['Modelo Ordem 1 Teta=' TetaStr ' Tau=' TauStr];
Str3= ['Modelo Ordem 2 Teta=' Teta2Str ' Tau=' Tau1Str ' / ' Tau2Str];

```

```

legend(Str1,Str2,Str3,3);

title('Sistema original x modelos ordem 1 e 2');
xlabel('tempo'); ylabel('pH'); grid;
axis ([0 TimeSimul 6 13]);

```

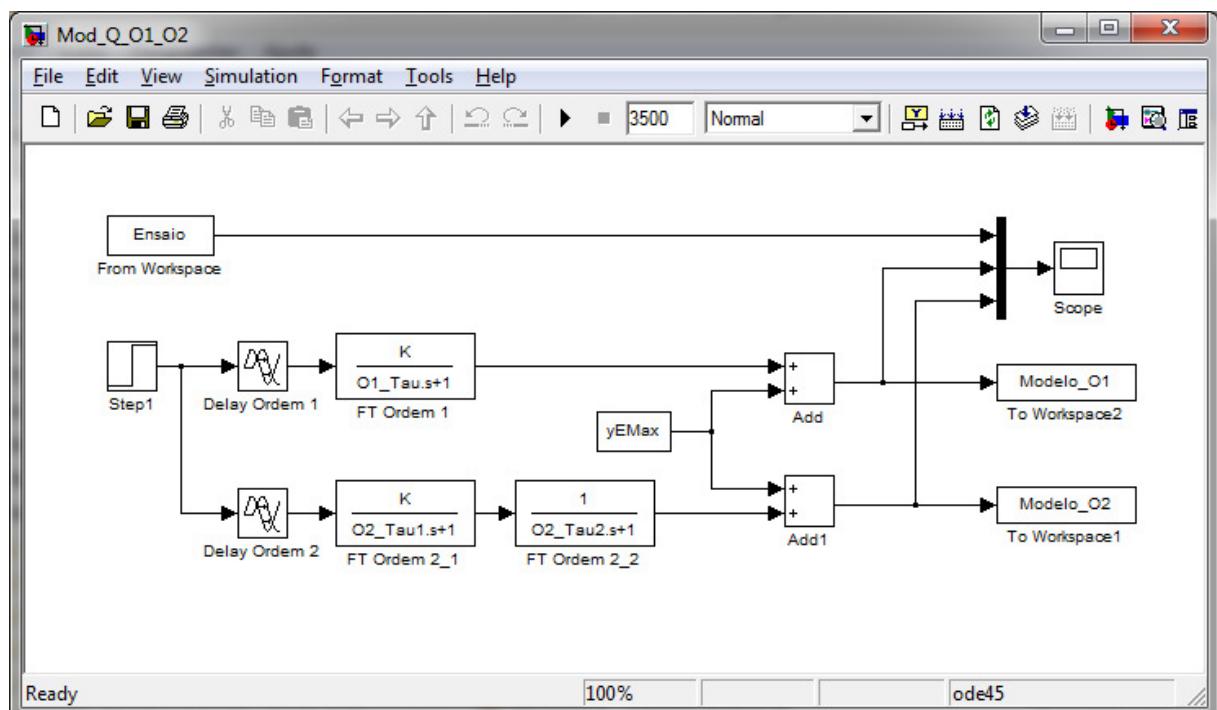


Figura F.1 - Simulação do pH em modelos de 1^a e 2^a ordem utilizando o SIMULINK / MATLAB®.