



Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP  
Faculdade de Engenharia Química  
Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos  
Área de Concentração Sistemas de Processos Químicos e Informática

# **ESTUDO DE SISTEMA DE LIMPEZA CIP USANDO IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS**

Autor: Rodrigo Sislian

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Área de Concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática.

**Campinas – São Paulo – Brasil**

**Julho – 2012**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Si82e                      Sislian, Rodrigo  
                                  Estudo de sistema de limpeza CIP usando  
                                  identificação de sistemas / Rodrigo Sislian. --Campinas,  
                                  SP: [s.n.], 2012.

                                  Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva  
                                  Coorientador: Rubens Gedraite.  
                                  Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
                                  Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

                                  1. Controle de processos. 2. Modelagem matemática.  
                                  I. Silva, Flávio Vasconcelos da. II. Gedraite, Rubens.  
                                  III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
                                  Engenharia Química. IV. Título.

Título em Inglês: Clean-in-Place system identification

Palavras-chave em Inglês: Process control, Mathematical modelling

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Leo Kunigk, Jones Erni Schmitz

Data da defesa: 20-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

**Folha de aprovação**

Dissertação de Mestrado defendida por Rodrigo Sislian e aprovada em 20 de  
Julho de 2012 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



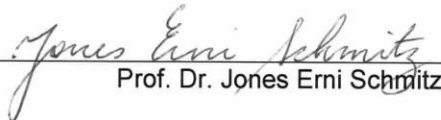
---

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva- Orientador



---


Prof. Dr. Leo Kunigk



---

Prof. Dr. Jones Erni Schmitz

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado defendida por **Rodrigo Sislian** e aprovada em 20 de Julho de 2012.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several fluid, overlapping strokes that form a stylized, abstract shape.

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

(Orientador)

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus por me possibilitar e sempre auxiliar na elaboração e conclusão deste trabalho.

À toda a minha família, em especial meus pais e minhas irmãs, que acompanharam de perto todo o meu esforço para a elaboração deste trabalho, sempre me incentivando.

Ao meu orientador Flávio Vasconcelos da Silva e meu coorientador Rubens Gedraite, por todo o auxílio, incentivo e sugestões, e pela paciência e disponibilidade fundamentais para a elaboração deste trabalho.

À toda a equipe da Escola de Engenharia Mauá, em especial aos professores Léo Kunigk, Sérgio Ribeiro e Valdir Melero Júnior e ao Douglas Dalla Justina, por terem disponibilizado o espaço, a bancada e seu tempo.

E a todos os amigos que participaram direta ou indiretamente, sempre me incentivando e dando forças.

*“As características daquele que busca constantemente o conhecimento, o levam naturalmente à evolução”. (Autor desconhecido)*

## RESUMO

A presença de resíduos em superfícies mal higienizadas pode aumentar a incidência de microrganismos e ocasionar problemas operacionais nos equipamentos de processo. A identificação da dinâmica do processo pode contribuir para a melhoria da sua eficiência, racionalizando o uso de água e energia empregada nas operações de enxágue.

Atualmente, a maioria dos processos de limpeza CIP é conduzida com base em procedimentos padronizados considerando a experiência dos operadores de processo no que tange ao tempo de funcionamento do ciclo.

Este trabalho aborda, em um primeiro momento, a implantação da instrumentação e do sistema de controle necessários para monitorar e controlar o processo e, na sequência, o levantamento experimental do comportamento do sistema a estímulos na vazão e/ou temperatura de operação do processo. Para tal foi utilizado um trocador de calor instalado em planta piloto com o objetivo de relacionar, ao longo do tempo, a variação da alcalinidade (pH) da água empregada para remoção do detergente alcalino utilizado no processo de limpeza com a temperatura e vazão da mesma.

Neste trabalho a planta utilizada possui dimensões de uma planta semi-industrial típica; tal característica possibilita que se considerem as dinâmicas e fenômenos encontrados em plantas reais, obtendo-se resultados de grande interesse prático. Os equipamentos utilizados (sensores, interfaces e atuadores) são padrão de mercado, adequadamente combinados e instalados de maneira a permitir o estudo de vários aspectos relacionados às etapas de um processo CIP.

Testes foram realizados na planta partindo dos parâmetros de sintonia calculados pelo método ITAE por Rovira para o controle de vazão do fluido de processo. Os valores finais dos parâmetros PID que apresentaram o melhor resultado e foram utilizados na planta foram:  $K_p = 2,68$  e  $T_i = 0,101$  s. Devido à diferença na dinâmica para aumento e redução da temperatura para o controle de temperatura do fluido de processo, partiu-se dos parâmetros de sintonia calculados pelo Método CHR sem sobrevalor. Os valores finais dos parâmetros PID que apresentaram o melhor resultado

nos testes e foram utilizados na planta foram: para o aumento da temperatura  $K_p = 6,394$ ,  $T_i = 3,640$  s e  $T_d=0,621$  s, e para a diminuição da temperatura, foi utilizado o controlador proporcional com o parâmetro  $K_p = 0,08$ .

A cinética da remoção foi avaliada a partir da variação do pH medido. Foram identificadas as dinâmicas da planta para diferentes condições operacionais que mostram que os parâmetros dinâmicos do sistema são fortemente influenciados pelas vazões e pouco afetados pelas temperaturas utilizadas, com maior contribuição para valores mais elevados de vazão ( $16 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ), onde há menor consumo de água.

Apesar de a identificação aproximada apresentar um modelo (com erro) que representa a resposta do processo, motivou-se o uso de uma metodologia de identificação mais refinada com o objetivo de comparação. Esta foi obtida através de modelos baseados no sistema de Inferência *Fuzzy* Neuro-Adaptativo (ANFIS) através do aplicativo Simulink/MATLAB®.

Os resultados obtidos com os modelos foram validados por comparação com os dados experimentais. Para este processo duas entradas (a saída atrasada em uma amostragem - pH [k-1] - e a vazão atual - F[k]) e uma saída (o pH atual - pH[k]) para o treinamento da rede, mostraram ser mais adequadas para modelar a resposta da dinâmica do pH na etapa de enxague estudada. O erro médio foi de 0,011 quando comparados os dados experimentais coletados com o modelo obtido (tanto com o uso do algoritmo *Grid partition* quanto com o algoritmo *Subtractive Clustering* e com o uso de 3 ou 5 funções de pertinência do tipo triangular).

Palavras chave: Controle de Processos, Modelagem matemática



## ABSTRACT

The presence of residues in poorly cleaned surfaces may increase the micro-organisms incidence and cause operational problems in process equipments. The process dynamics identification can contribute to improve efficiency, rationalizing the energy and water used in rinsing operations.

Nowadays, most of CIP cleaning process is conducted based on standard procedures considering the process operators' experience regarding the operating time cycle.

This paper discusses, at first, the instrumentation and control system implementation required to monitor and control the process and, after that, the experimental tests to analyze the system behavior to stimuli in flow and/or process operating temperature. For that it was used a heat exchanger installed in a pilot plant in order to relate, over time, the water alkalinity (pH) variation used to remove alkaline detergent used in the cleaning process with the temperature and flow rate of the same.

The plant used in this study has the typical dimensions of a semi-industrial plant; this characteristic makes it possible to consider the dynamic and phenomena found in real plants, obtaining results of great practical interest. It was used industry standard equipments (sensors, actuators and interfaces) properly combined and installed so as to allow the study of various aspects related to the CIP process stages.

Tests were done in the plant starting with the tuning parameters calculated by the ITAE by Rovira method to control the process fluid flow. The final PID parameters values that presented the best results and were used in the plant were:  $K_p = 2.68$  and  $T_i = 0.101$  s. Due to the difference in dynamics for increasing and decreasing temperature to control the process fluid temperature, It was started from the tuning parameters calculated by the CHR method without over value. The final PID parameter values that had the best results in the plant and were used were: for the temperature increase  $K_p = 6,394$ ,  $T_i = 3,640$  s and  $T_d=0,621$  s, and for decreasing temperature it was used a

proportional controller with the parameter  $K_p = 0.08$ .

The kinetics removal was evaluated starting from the measured pH variation. The plant dynamics were identified for different operating conditions which shows that the system's dynamic parameters are strongly influenced by the flow and little affected by the temperatures used, with a greater contribution for higher flow levels ( $16 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ), where there is less water consumption.

Although the approximate identification provide a suitable model (with error) that represents the process response, there was a motivation for the use of a more refined identification methodology with the objective of comparing. It was obtained by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) model-based via Simulink/MATLAB<sup>®</sup> software.

The results obtained with those models were validated by comparison with the experimental data. For this process two inputs (the output delayed by one sample - pH [k-1] - and the current flow - F[k]) and one output (the current pH - pH [k]) to the network training, revealed to be more appropriate to model the pH dynamics response in the rinse step studied. The average error was 0,011 when comparing the experimental collected data with the obtained model (either using the *Grid Partition* algorithm and the *Subtractive Clustering* algorithm and using 3 or 5 triangular membership functions).

Keywords: Process Control, Mathematical Modelling

## Sumário

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>1.2 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Histórico do processo de sanitização de instalações industriais alimentícias</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Processo de higiene e sanitização de equipamentos empregados em instalações industriais alimentícias</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Formação de biofilme</b>	<b>7</b>
<b>2.4 Etapas envolvidas em processos de higienização de superfícies</b>	<b>9</b>
2.4.1 <i>Pré-lavagem</i> .....	12
2.4.2 <i>Aplicação de soluções de detergentes</i> .....	13
2.4.2.1 <i>Detergentes alcalinos</i> .....	17
2.4.2.2 <i>Detergentes ácidos</i> .....	19
2.4.3 <i>Enxágue</i> .....	20
2.4.4 <i>Sanitização</i> .....	20
2.4.5 <i>Enxágue</i> .....	23
<b>2.5 Sistemas de Higienização</b>	<b>23</b>
<b>2.6 Sistemas de controle tipicamente empregados em sistemas CIP</b>	<b>27</b>
<b>2.7 Modelagem matemática e identificação de sistemas</b>	<b>34</b>
2.7.1 <i>Modelagem aproximada de 1ª ordem com atraso de transporte</i> .....	37
2.7.2 <i>Modelagem Neuro-Fuzzy</i> .....	41

<b>CAPÍTULO 3. MATERIAIS &amp; MÉTODOS.....</b>	<b>64</b>
<b>3.1 Materiais utilizados</b>	<b>64</b>
<b>3.2 Metodologia empregada</b>	<b>81</b>
<i>3.2.1 Metodologia empregada para obtenção das curvas de resposta de vazão e temperatura.....</i>	<i>82</i>
<i>3.2.2 Metodologia empregada para sintonia dos controladores .....</i>	<i>84</i>
<i>3.2.3 Metodologia para obtenção de modelo simplificado da etapa de enxágue .....</i>	<i>85</i>
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>94</b>
<b>4.1 Curvas de respostas de vazão e temperatura</b>	<b>94</b>
<b>4.2 Sintonias dos controladores de vazão e temperatura</b>	<b>99</b>
<i>4.2.1 Sintonia do controlador da vazão do fluído de processo .....</i>	<i>109</i>
<i>4.2.2 Sintonia do controlador da temperatura de saída do fluído de processo.....</i>	<i>111</i>
<b>4.3 Modelagem matemática do comportamento do pH em função do tempo</b>	<b>114</b>
<i>4.3.1 Comportamento do pH em função da variação da temperatura .....</i>	<i>115</i>
<i>4.3.2 Comportamento do pH em função da variação da vazão.....</i>	<i>116</i>
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>147</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>149</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>150</b>
<b>APÊNDICE A - Esquema elétrico das conexões do inversor de frequência .....</b>	<b>156</b>
<b>APÊNDICE B - Painel frontal e diagrama em blocos do programa para coleta dos dados em plataforma LabVIEW.....</b>	<b>157</b>
<b>APÊNDICE C - Painel frontal e diagrama em blocos do programa dos controladores e obtenção de valores de pH em plataforma LabVIEW® .....</b>	<b>159</b>

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Principais elementos de processo .....	35
Tabela 3.1 – Resultados experimentais do estudo da incrustação .....	89
Tabela 4.1 – Parâmetros de sintonia – Método: Ziegler & Nichols .....	100
Tabela 4.2 – Parâmetros de sintonia – Método: CHR sem sobrevalor .....	100
Tabela 4.3 – Parâmetros de sintonia – Método: CHR 20% de sobrevalor .....	100
Tabela 4.4 – Parâmetros de sintonia – Método: Cohen & Coon.....	100
Tabela 4.5a – Parâmetros de sintonia – Método: ITAE-Lopez .....	101
Tabela 4.5b – Parâmetros de sintonia – Método: ITAE-Lopez.....	101
Tabela 4.6a – Parâmetros de sintonia – Método: ITAE-Rovira .....	101
Tabela 4.6b – Parâmetros de sintonia – Método: ITAE-Rovira .....	101
Tabela 4.7 – Parâmetros teóricos para sintonia dos controladores.....	102
Tabela 4.8 – Regras obtidas para o modelo com duas entradas e uma saída (grid partition).....	135
Tabela 4.9 – Regras obtidas para o modelo com duas entradas e uma saída (subtractive clustering).....	139
Tabela 4.10 – Regras obtidas para o modelo com duas entradas e uma saída (grid partition).....	144
Tabela 4.11 – Comparação entre as metodologias de modelagem do sistema de Inferência <i>Fuzzy</i> Neuro-Adaptativo (ANFIS) .....	145

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Controladores Lógicos Programáveis Fonte: Rockwell .....	28
Figura 2.2 – Pré-enxágue do sistema em estudo com água recuperada Fonte: KHS – Ziemann Lies .....	30
Figura 2.3 – Limpeza do sistema em estudo com solução de soda cáustica Fonte: KHS – Ziemann Lies.....	31
Figura 2.4 – Enxágue intermediário do sistema em estudo com água tratada Fonte: KHS – Ziemann Lies.....	31
Figura 2.5 – Esterilização do sistema em estudo com água quente Fonte: KHS – Ziemann Lies .....	32
Figura 2.6 – Resfriamento do sistema em estudo com água tratada proveniente da rede Fonte: KHS – Ziemann Lies .....	32
Figura 2.7 – Aplicação do método da tangente para determinação dos parâmetros $\theta$ e $\tau$ do modelo representado por um sistema de 1ª ordem mais atraso de transporte.....	38
Figura 2.8 – Obtenção dos parâmetros $\theta$ e $\tau$ pelo método dos 63,2% a partir de uma curva de reação do processo .....	39
Figura 2.9 – Função de pertinência triangular Fonte: Benini e Júnior (2008).....	43
Figura 2.10 – Função de pertinência trapezoidal Fonte: Benini e Júnior (2008)....	44
Figura 2.11 – Função de pertinência Fuzzy-ton ou singleton Fonte: Benini e Júnior (2008).....	44
Figura 2.12 – Função de pertinência gaussiana Fonte: Benini e Júnior (2008).....	44

Figura 2.13 – Exemplo representativo de funções de pertinência Fonte: Benini e Júnior (2008).....	45
Figura 2.14. (a) Diagrama dos conjuntos A e B (b) Diagrama da união $A \cup B$ Fonte: Benini e Júnior (2008).....	46
Figura 2.15. (a) Diagrama dos conjuntos A e B (b) Diagrama da intersecção $A \cap B$ Fonte: Benini e Júnior (2008).....	47
Figura 2.16. Diagrama do complemento ( $\bar{A}$ ) do conjunto A Fonte: Benini e Júnior (2008).....	47
Figura 2.17. Processo de inferência Takagi-Sugeno com duas regras definidas Fonte: Benini e Júnior (2008).....	54
Figura 2.18. Neurônio típico Fonte: Benzecry et al. (2008).....	55
Figura 2.19. Exemplo de um grafo direcionado.....	56
Figura 2.20 – Rede neural artificial em camadas Fonte: Barreto, 2002.....	57
Figura 2.21 – Etapa de cálculo das saídas e dos erros Fonte: < <a href="http://www.labinfo.Incc.br/">http://www.labinfo.Incc.br/</a> >.....	60
Figura 2.22 – Etapa de ajuste dos pesos Fonte: < <a href="http://www.labinfo.Incc.br/">http://www.labinfo.Incc.br/</a> >.....	61
Figura 3.1 – Equipamentos e instrumentação para o processo de limpeza CIP ...	64
Figura 3.2a – Diagrama esquemático simplificado do sistema.....	66
Figura 3.2b – Diagrama representativo do processo e da instrumentação.....	67
Figura 3.3 – Placa de aquisição de dados usada no trabalho Fonte: National Instruments, 2012.....	68
Figura 3.4 – Régua de bornes usada no trabalho.....	68
Figura 3.5 - Planta com trocador de calor tipo feixe tubular instrumentado.....	70
Figura 3.6 - Tubos internos do trocador de calor para o fluido de processo.....	71

<b>Figura 3.7 - Seções de passagem do fluido de processo nos tubos do trocador de calor.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 3.8 - Válvulas para manobra da saída do fluido de processo ao reservatório de entrada ou descarte .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 3.9 - Rotor helicoidal de bomba centrífuga .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 3.10 - Bomba de deslocamento para fluido de processo.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 3.11 - Bomba centrífuga para circulação de água quente .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 3.12 - Válvula pneumática da malha de controle de temperatura .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 3.13 - Posicionamento dos elementos de medição de temperatura da entrada (T3) e saída (T1) do fluido de processo .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 3.14 - Posicionamento dos elementos de medição das temperaturas da entrada (T4) e saída (T2) da água quente de aquecimento.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 3.15 - Vista interna do medidor de vazão (METROVAL, 2007).....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 3.16 - Esquema com princípio de funcionamento das engrenagens ovais do medidor de vazão (METROVAL, 2007).....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 3.17 - Instalação do medidor de vazão METROVAL modelo OI - 2 SMRX/FS .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 3.18 - Acoplador do sinal de vazão METROVAL modelo METROFLUX AG19 .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 3.19 - Medidor de pH MICRONAL, modelo B-474 - phmetro .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 3.20 - Tela do programa para leitura do sinal serial de pH. ....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 3.21 - Inversor de frequência.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 3.22 - Conversor I/P ENGINSTREL modelo 621IPB .....</b>	<b>80</b>



<b>Figura 3.23 - Condicionadores de sinais para medidas de temperaturas e atuação no conversor I/P da válvula eletropneumática de vapor. ....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 3.24 - Fluxograma básico com as etapas do processo CIP para estudo da etapa de enxágue. ....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 3.25 - Diagrama em blocos do processo para etapa da obtenção dos dados para a modelagem não paramétrica ....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 3.26 - Representação do sistema de estudo da incrustação ....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 4.1a - Variável desvio - vazão PV (Variação da MV de 7 V para 10 V) ....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 4.1b - Sinal enviado a inversor de frequência (MV) com degraus simétricos de 7 V para 10 V.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 4.2a - Variável desvio - Temperatura PV à variações da MV.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 4.2b – Abertura da válvula de vapor (MV) .....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 4.3a – Comparação entre os dados coletados e o modelo aproximado obtido para a vazão.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 4.3b – Comparação entre os dados coletados e o modelo aproximado obtido para a temperatura .....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 4.4a – Blocos do Simulink/MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores proporcionais de vazão .....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 4.4b - Blocos do Simulink/MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores proporcionais de temperatura .....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 4.5a - Comportamento temporal (simulação) dos controladores proporcionais de vazão perturbadas por um degrau unitário.....</b>	<b>104</b>

Figura 4.5b - Comportamento temporal (simulação) dos controladores proporcionais de temperatura perturbadas por um degrau unitário. .....	105
Figura 4.6a - Blocos do Simulink/MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores PI de vazão.....	105
Figura 4.6b - Blocos do Simulink/MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores PI de temperatura.....	106
Figura 4.7a - Comportamento temporal (simulação) dos controladores PI de vazão perturbadas por um degrau unitário. ....	106
Figura 4.7b - Comportamento temporal (simulação) dos controladores PI de temperatura perturbadas por um degrau unitário.....	107
Figura 4.8 - Blocos do Simulink/MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores PID de temperatura.....	108
Figura 4.9 - Comportamento temporal (simulação) dos controladores PID de temperatura perturbadas por um degrau unitário.....	108
Figura 4.10a - Variável desvio - vazão PV (Variação do set-point de 10 L.min <sup>-1</sup> para 11 L.min <sup>-1</sup> ) .....	110
Figura 4.10b - Sinal enviado a inversor de frequência (MV) à variações no set-point de vazão .....	111
Figura 4.11a - Variável desvio - temperatura PV (Variação do set-point de 50°C para 70 °C).....	113
Figura 4.11b - Sinal enviado à válvula proporcional de vapor (MV) à variações no set-point de temperatura .....	114
Figura 4.12 – pH medido x pH após filtragem de sinal para vazão de 9 L.min <sup>-1</sup> ..	115

<b>Figura 4.13 – Comportamento do pH em função de variações da temperatura ..</b>	<b>116</b>
<b>Figura 4.14 – Comportamento do pH em função de variações da vazão .....</b>	<b>117</b>
<b>Figura 4.15 – Programa MATLAB® para comparação entre os valores de pH coletado e modelado da água de enxague para degrau na vazão de 0 para 4 L.min<sup>-1</sup> .....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 4.16 – Programa MATLAB® para comparação entre os valores de pH coletado e modelado da água de enxague para degrau na vazão de 0 para 7,5 L.min<sup>-1</sup> .....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 4.17 – Programa MATLAB® para comparação entre os valores de pH coletado e modelado da água de enxague para degrau na vazão de 0 para 12 L.min<sup>-1</sup> .....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 4.18 – Comportamento do pH coletado x modelado e o erro (pH modelo – pH coletado) para degrau na vazão de 0 para 4 L.min<sup>-1</sup> .....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 4.19 – Comportamento do pH coletado x modelado e o erro (pH modelo – pH coletado) para degrau na vazão de 0 para 7,5 L.min<sup>-1</sup> .....</b>	<b>121</b>
<b>Figura 4.20 – Comportamento do pH coletado x modelado e o erro (pH modelo – pH coletado) para degrau na vazão de 0 para 12 L.min<sup>-1</sup> .....</b>	<b>121</b>
<b>Figura 4.21 – Dados para o treinamento da rede com uma entrada e uma saída</b>	<b>124</b>
<b>Figura 4.22 – Treinamento da rede com uma entrada e uma saída (grid partition) .....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 4.23 – Funções de pertinência triangulares (grid partition).....</b>	<b>125</b>
<b>Figura 4.24 – Modelo do sistema Fuzzy desenvolvido (3 funções de pertinência – uma entrada e uma saída - grid partition) .....</b>	<b>126</b>

<b>Figura 4.25 – Superfície de resposta (3 funções de pertinência – uma entrada e uma saída - grid partition) .....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 4.26 – Modelo ANFIS do pH coletado X pH modelado para um degrau na vazão de 0 L.min<sup>-1</sup> para 7,5 L.min<sup>-1</sup> (grid partition com três funções de pertinência triangulares) .....</b>	<b>127</b>
<b>Figura 4.27 – Treinamento da rede com uma entrada e uma saída (subtractive clustering).....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 4.28 – Funções de pertinência triangulares (subtractive clustering).....</b>	<b>129</b>
<b>Figura 4.29 – Modelo do sistema Fuzzy desenvolvido (3 funções de pertinência – uma entrada e uma saída - subtractive clustering).....</b>	<b>129</b>
<b>Figura 4.30 – Superfície de resposta (3 funções de pertinência – uma entrada e uma saída - subtractive clustering) .....</b>	<b>130</b>
<b>Figura 4.31 – Modelo ANFIS do pH coletado X pH modelado para um degrau na vazão de 0 L.min<sup>-1</sup> para 7,5 L.min<sup>-1</sup> (subtractive clustering).....</b>	<b>131</b>
<b>Figura 4.32 – Dados para o treinamento da rede com duas entradas e uma saída (grid partition).....</b>	<b>132</b>
<b>Figura 4.33 – Entrada - Vazão para o treinamento da rede (grid partition) .....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 4.34 – Entrada – pH atrasado em 1 amostragem para o treinamento da rede (grid partition).....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 4.35 – Regras do modelo com duas entradas e uma saída (grid partition) .....</b>	<b>134</b>
<b>Figura 4.36 – Superfície de resposta do modelo com duas entradas e uma saída (grid partition).....</b>	<b>134</b>

Figura 4.37 – Modelo ANFIS do pH coletado X pH modelado para um degrau na vazão de 0 L.min <sup>-1</sup> para 7,5L.min <sup>-1</sup> (grid partition).....	135
Figura 4.38 – Dados para o treinamento da rede com duas entradas e uma saída (subtractive clustering).....	136
Figura 4.39 – Entrada - Vazão para o treinamento da rede (subtractive clustering) .....	137
Figura 4.40 – Entrada – pH atrasado em 1 amostragem para o treinamento da rede (subtractive clustering).....	137
Figura 4.41 – Regras do modelo com duas entradas e uma saída (subtractive clustering).....	138
Figura 4.42 – Superfície de resposta do modelo com duas entradas e uma saída (subtractive clustering).....	139
Figura 4.43 – Modelo ANFIS do pH coletado X pH modelado para um degrau na vazão de 0 L.min <sup>-1</sup> para 7,5L.min <sup>-1</sup> ( <i>subtractive clustering</i> ).....	140
Figura 4.44 – Dados para o treinamento da rede com duas entradas e uma saída (subtractive clustering).....	141
Figura 4.45 – Entrada - Vazão para o treinamento da rede (grid partition) .....	142
Figura 4.46 – Entrada – pH atrasado em 1 amostragem para o treinamento da rede (grid partition).....	142
Figura 4.47a – Regras do modelo com duas entradas e uma saída ( <i>grid partition</i> ) .....	143
Figura 4.47b – Regras do modelo com duas entradas e uma saída ( <i>grid partition</i> ) – continuação .....	143

Figura 4.48 – Superfície de resposta do modelo com duas entradas e uma saída ( <i>grid partition</i> ).....	144
Figura 4.49 – Modelo ANFIS do pH coletado X pH modelado para um degrau na vazão de 0 L.min <sup>-1</sup> para 7,5L.min <sup>-1</sup> ( <i>subtractive clustering</i> ).....	145
Figura A.1 – Esquema elétrico das conexões do inversor de frequência .....	156
Figura B.1 – Painel Frontal do programa para coleta de dados em LabVIEW .....	157
Figura B.2 – Diagrama em blocos do programa para coleta de dados em LabVIEW®.....	158
Figura C.1 – Painel frontal dos controladores: aquisição da vazão, temperaturas e pH usando LabVIEW®.....	159
Figura C.2 – Diagrama em blocos dos controladores: aquisição da vazão, temperaturas e pH usando LabVIEW®.....	160

# CAPÍTULO 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, isolamento de agentes oxidantes, controle de temperatura, pasteurização<sup>1</sup>, 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 sanitização<sup>2</sup>. 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

---

<sup>1</sup> Técnica elaborada por Louis Pasteur, que consiste em tratamento térmico para eliminar os micro-organismos presentes em produtos alimentícios (TETRAPAK, 2012).

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

estabelecimento das cinéticas de remoção de resíduos de cada etapa do processo.

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 e 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 Edifício Prof. Walter Borzani 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 proteica 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 **objetivo geral** a instrumentação de um processo de limpeza CIP aplicado nos tubos internos de um trocador de calor para o monitoramento, controle e coleta adequada de dados.

O trabalho tem como **objetivo específico** a análise da influência da vazão e da temperatura na remoção do detergente alcalino em um processo de limpeza CIP típico através da modelagem do comportamento dinâmico da etapa de enxágue de tal processo.

## **1.2 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO**

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.

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 semi-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* foram 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 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, além da possibilidade de uma comparação e estudo da modelagem aproximada de 1ª ordem + atraso de transporte com a modelagem utilizando o sistema de Inferência *Fuzzy* Neuro-Adaptativo (ANFIS).

## **CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### ***2.1 Histórico do processo de sanitização de instalações industriais alimentícias***

Desde os primórdios da civilização humana, a conservação dos alimentos foi uma de suas necessidades. Esta atividade era necessária para garantir a qualidade dos alimentos durante o período de inverno ou durante deslocamentos.

Vários tipos de sistemas de conservação dos alimentos foram desenvolvidos ao longo dos séculos: salgar e defumar carnes e peixes, secar ao sol carnes e frutas, etc. Mais recentemente, após os trabalhos de Louis Pasteur, passou-se a utilizar a técnica de ferver os alimentos e mantê-los hermeticamente selados para evitar a entrada de ar e de microrganismos.

Com o advento da era industrial os alimentos passaram a ser processados e várias tecnologias foram criadas para sua elaboração, manuseio, conservação e transporte. O processamento dos alimentos por máquinas levou à necessidade do desenvolvimento de várias técnicas para a limpeza das mesmas após o seu uso, de maneira a não deixar resíduos onde pudessem proliferar micro-organismos que iriam contaminar outros alimentos a serem processados posteriormente.

A limpeza e a subsequente sanitização ou desinfecção de qualquer item ou equipamento de uma instalação industrial de processamento de alimentos, produtos farmacêuticos ou de bebidas, deve ser realizada com o máximo cuidado e atenção para assegurar a qualidade do produto final.

No início, o processo de limpeza era um processo manual, o qual ainda é utilizado em instalações industriais de pequeno porte. Nestes casos, é vital que haja uma meticulosa atenção nos detalhes, pois, devido a razões de saúde e segurança, somente soluções químicas brandas e frias (detergentes) podem ser utilizadas.

A fabricação de produtos farmacêuticos, alimentícios e bebidas seria grandemente facilitada se os equipamentos e tubulações usados em seu processamento pudessem ser desmontados, postos em uma pia, vigorosamente escovados e então postos em um esterilizador para remover os contaminantes (Harrold, 2000). Obviamente as técnicas

de limpeza utilizadas em laboratório são impraticáveis na maioria das instalações industriais de grande escala de produção. Os vasos, equipamentos e tubulações devem ser limpos no local onde estão instalados. O Processo de Limpeza no Local (Clean-in-Place – 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.

## ***2.2 Processo de higiene e sanitização de equipamentos empregados em instalações industriais alimentícias***

As condições higiênico-sanitárias de um alimento, que garantem sua palatabilidade, qualidade e segurança, estão intimamente ligadas com o processo de higienização das instalações em que foi processado. 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 e MACEDO, 1996).

Os microrganismos, presentes na matéria-prima processada, aderem aos resíduos sólidos surgidos após a passagem da mesma em um equipamento (REINEMANN e RABOTSKI, 1993). Portanto, a higienização adequada de um equipamento é fundamental para a remoção dessas sujidades. De acordo com (Bansal e Chen, 2005) um trocador de calor utilizado na indústria de laticínios deve ser higienizado diariamente para manter seus padrões de qualidade.

A presença de resíduos não só propicia condições para a proliferação de microrganismos, como também afeta as condições de operação dos trocadores de calor, pois reduz as taxas de transferência de calor provocando um sub-processamento do produto, devido às temperaturas necessárias para a realização dos tratamentos térmicos, como pasteurização e esterilização, não serem atingidas, propiciando-lhe condições para o desenvolvimento de uma microbiota deteriorativa e/ou patogêna durante seu armazenamento. A presença de resíduos sobre as superfícies também aumenta os níveis de queda de pressão no equipamento por aumentar a rugosidade superficial (BANSAL e CHEN, 2005; FRYER et al., 2006).

Higienizar adequadamente o equipamento pode 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.

Gillham et al. (2000) e Fryer et al. (2006) citam também os custos envolvidos com a utilização de produtos químicos e com o impacto ambiental. A regularidade de procedimentos de higienização pela empresa diminui os problemas acima mencionados. A principal preocupação dos efluentes do ponto de vista ambiental relacionada ao processo de higienização é o pH das soluções. Quando soluções fortemente alcalinas são utilizadas, recomenda-se neutralizá-las, após sua utilização, para que seu pH diminua e somente então descartá-las (SCHMIDT, 1997).

De acordo com Beuf et al. (2003) a indústria leiteira holandesa gasta mais de US\$ 40 milhões com problemas gerados pela formação de resíduos. Para Van 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.

O entendimento e a consequente otimização de um processo de higienização permite a redução dos custos envolvidos neste processo (JEURNINK e BRINKMAN, 1994). Para otimizar um processo de higienização é necessário o entendimento de como são gerados os resíduos e aplicar esses conhecimentos nas tomadas de decisões efetivas para sua remoção.

### **2.3 Formação de biofilme**

A formação de resíduos em um equipamento propicia a adesão de microrganismos por fornecer substrato aos mesmos (BANSAL e CHEN, 2005). Os microrganismos 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 e

MACEDO, 1996; MITTELMAN, 1998).

De acordo com (Bott 1993 apud Bansal e Chen, 2005) a fixação de microrganismos na superfície de um trocador de calor pode ocorrer diretamente sobre o material do equipamento ou sobre a camada de depósito formada durante os processamentos. Gaxetas, presentes em trocadores de calor, apresentam condições favoráveis ao desenvolvimento de biofilme, devido à sua difícil higienização (HONER, 1992; WONG, 1998).

Conforme Mittelman (1998), durante as operações em indústrias de processamento de alimentos, os biofilmes são difíceis de serem reconhecidos e eliminados. Por mecanismos próprios, tal qual a formação de biopolímero extracelular (EPS) excretado que age como barreira à difusão de agentes sanitizantes, os microrganismos presentes nessa estrutura são capazes de resistir à ação de bactericidas. Estudos relatados por Mittelman (1998) mostram uma redução 100 vezes menor na população de *Listeria monocytogenes* quando estas estão instaladas em biofilmes.

A presença do biofilme 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 e parasitas, que podem ser evitadas através de um processo de higienização correto (ANDRADE e MACEDO, 1996). Isto é evidenciado na informação de que taxas de 5 a 10% das toxinfecções de origem alimentar possuem como causa processos de higienização de equipamentos mal realizados (MANCINI, 1992 apud KUNIGK, 1998). Além de patologias, várias espécies de microrganismos podem gerar processos deteriorativos nos alimentos. Esta situação gera perdas econômicas pela diminuição da confiança do consumidor na imagem da empresa (ANDRADE e MACEDO, 1996).

Prevenir a instalação de um biofilme é a chave para seu controle, portanto, a higienização deve ser feita frequentemente com a aplicação de tratamentos combinados e com uma monitoração constante das superfícies (MITTELMAN, 1998).

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.

#### **2.4 Etapas envolvidas em processos de higienização de superfícies**

Antes de descrever o processo de higienização de superfícies em contato com alimentos é importante diferenciar as suas duas principais etapas: limpeza e sanitização.

De acordo com Schmidt (1997), limpeza é a remoção total de resíduos sólidos presentes nas superfícies através da utilização de detergentes químicos. Sanitização é definida como a redução da população microbiana até níveis considerados seguros para a saúde pública. Um processo eficiente de sanitização caracteriza-se, segundo a *Association of Analytical Communities* (AOAC), por reduzir a população microbiana presente em uma suspensão, em 5 ciclos logarítmicos por 30 segundos.

A sanitização pode ser realizada 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).

Com base nas informações anteriormente citadas parece evidente a necessidade de um correto programa de higienização de equipamentos pelas empresas processadoras de alimentos, a fim de se retirar as sujidades decorrentes do sistema produtivo. De acordo com Honer (1992) “se a higienização não for correta, a produção não será correta”.

O objetivo da higienização de superfícies é a remoção 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.

A primeira característica é, como já relatado, a composição do resíduo. A primeira fonte de formação dos resíduos sólidos nos equipamentos é o próprio alimento que está

sendo processado. Vale lembrar que também contribuem para essas formações, os minerais presentes na água utilizada no processo de higienização e a presença de biofilmes. Dessa forma, a composição dos resíduos sólidos varia extensamente, caracterizando-se pela presença de componentes dos alimentos e sais de águas duras (SCHMIDT, 1997).

O entendimento de como a sujeira encontra-se aderida à superfície de um equipamento é outro passo importante para se estruturar um eficiente processo de higienização. A sujeira pode estar aderida à superfície de quatro maneiras distintas: mecanicamente aprisionada em espaços vazios existentes; através da ação de forças de coesão; unida por ação química ou pela presença de forças adsortivas (KUNIGK, 1998). Sua deposição sobre uma superfície é um processo espontâneo, resultando em uma aparente queda de energia livre do sistema (energia livre de Gibbs). Então para realizar a limpeza da superfície, ou seja, reverter a situação, é necessário fornecer energia mecânica ou físico-química ao sistema (PASSOS, 1992).

Corroboram com o descrito no parágrafo acima Andrade e Macedo (1996) e Reinemann e Rabotski (1993). De acordo com esses autores, um eficiente processo de higienização é conseguido com a otimização dos quatro principais fatores envolvidos neste processo: energias química, mecânica e física e o tempo de contato dos produtos utilizados com as superfícies a serem higienizadas.

A energia química é utilizada no momento da realização das reações que ocorrem durante o processo, 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 à superfície (ANDRADE e MACEDO, 1996; GIBSON et al.; 1999).

Energia mecânica será 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 Clean-in-Place (CIP) onde a tensão de cisalhamento, aplicada pelo fluxo dos agentes de higienização em um equipamento,



promove a remoção de resíduos (JEURNINK e BRINKMAN, 1994; ANDRADE e MACEDO, 1996; GIBSON et al.; 1999).

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

O estabelecimento do tempo adequado ao processo de limpeza e sanitização é fundamental para a eficiência do processo. Deve ser suficientemente longo para que as reações químicas ocorram a contento. Porém é importante observar que as reações químicas de higienização ocorrem com maior eficiência nos minutos iniciais de contato. 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 e MACEDO, 1996).

A implantação de um correto processo de higienização reverte em custos para a indústria, justificando o porquê de muitas vezes ser realizado de forma negligenciada. Rebello (1988 apud Jun e Puri, 2005) relatou que na década de 80 o custo estimado anual com o processo de higienização pelas indústrias norte-americanas encontrava-se entre US\$ 4 e 7 bilhões. Destes, 23,9% se deviam à água utilizada e 7,5%, aos agentes de limpeza. Sandu e Sinch (1991) estimam em US\$ 20 milhões o custo anual com agentes de limpeza na indústria leiteira. Para Pritchard et al. (1988) apud Grant et al. (1997), 42% do tempo disponível nesse setor são destinados a processos de higienização.

O grande desafio da higienização moderna é aumentar sua efetividade e diminuir seus custos. Parâmetros envolvidos no processo como temperaturas, concentrações e volume de soluções devem ser reduzidos tanto quanto for possível. Custo energético está envolvido na elevação e manutenção das temperaturas das soluções (MROZEK, 1985).

A água utilizada nas diferentes etapas do processo é um fator importante a ser considerado. Reduzir a quantidade de água proporciona economia em três frentes:

minimização do custo da própria água, de energia para aquecimento e de reagentes químicos para preparo das soluções, além de evitar gastos excessivos com o tratamento de efluentes (MROZEK, 1985). Também é importante salientar que a utilização de água dura acarreta elevação dos custos do processo, pois aumenta o consumo de detergentes (GIESE, 1991).

O estabelecimento da cinética de remoção de resíduos pode otimizar a realização de operações de higienização e construção de trocadores de calor, resultando em redução dos custos operacionais desses equipamentos na ordem pelo menos 50% (Jong, 1997 apud, Jun e Puri, 2005). De acordo com Jeurnink e Brinkman (1994), a otimização dos procedimentos de higienização reduzem seus custos energéticos em taxas de até 50%. Por sua vez os custos com agentes de higienização são reduzidos em 25% e o nível de perdas de produtos apresenta uma redução de 5%.

Um processo de higienização adequado estabelece um procedimento padrão composto pelas seguintes etapas (SCHMIDT, 1997; ANDRADE e MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; GIESE, 1991):

#### *2.4.1 Pré-lavagem*

Etapa em que só é utilizada água. Visa reduzir a quantidade de resíduos presentes na superfície dos equipamentos. 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 e MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; FRYER et al., 2006).

A facilidade com a qual o resíduo será removido da superfície é função da sua solubilidade. Dessa forma são classificados de acordo com esse quesito em (SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975):

- i)* Solúveis em água: açúcares, alguns tipos de amidos, maioria dos sais;
- ii)* Solúveis em ácidos: maioria dos depósitos minerais;
- iii)* Solúveis em álcalis: proteínas, emulsões gordurosas;

iv) Solúveis em água, álcali ou ácido.

É importante que se analise também a condição em que se encontra o resíduo para verificar se o mesmo está seco, fresco, esponjoso ou cozido (REED, 1992).

A temperatura adequada da água deve estar na faixa de 38°C a 46°C, pois temperaturas superiores podem provocar desnaturação de proteínas, que facilita a aderência desses compostos à superfície dos equipamentos; temperaturas mais baixas podem ocasionar a solidificação de gorduras, que prejudica a eficiência da limpeza (Leitão, 1975). Por outro lado estudos realizados por Middlemiss et al. (1985) demonstraram que o nível de remoção de resíduos com água a 20°C apresentou resultados similares aos obtidos à temperatura de 40°C. De acordo com o autor, a remoção de resíduos neste caso é basicamente um processo físico de separação dos substratos mais fracamente aderidos.

De acordo com Middlemiss et al. (1985) estudos realizados por outros pesquisadores revelam um aumento na formação de pedras de leite quando a temperatura da água nesta etapa era igual ou superior a 49°C.

O tempo da pré-lavagem deve ser cuidadosamente estimado. 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 cujos tratamentos tornar-se-ão mais custosos (TURNER, 1982).

#### *2.4.2 Aplicação de soluções de detergentes*

Etapa realizada para a remoção da sujidade mais aderida à superfície que não foi removida na etapa anterior. Aplica-se uma solução de detergente, que é definido como toda substância que, sozinha ou misturada, reduz o trabalho necessário para realizar um processo de limpeza (PASSOS, 1992).

A correta execução da etapa de limpeza com detergentes permite que a etapa de sanitização se realize de forma adequada, pois a maioria dos sanitizantes reage com matéria orgânica provocando, dessa forma, redução na sua eficiência (Hobbs e

Roberts, 1997). Além do efeito sobre os resíduos, os detergentes atuam diretamente sobre a população microbiana em uma superfície. Estudos realizados por Gibson et al. (1999) demonstraram a redução em 1 ciclo logaritmo da população de microrganismos localizados em superfície de aço inoxidável. Os mesmos autores mencionam estudos anteriores nos quais a redução alcançada nesta etapa foi de aproximadamente 3 ciclos logaritmos.

O detergente entra em contato com a sujidade aderida no equipamento, separando-a e dispersando-a no solvente (no caso a água), com o intuito de prevenir nova deposição. Para realizar essa tarefa, a concentração da solução, a temperatura de aplicação e o tempo de contato com o resíduo devem ser definidos de acordo com as condições de trabalho existentes (ANDRADE e MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975).

Para a correta aplicação das soluções de detergentes, alguns parâmetros operacionais devem ser observados. A temperatura de utilização é de suma importância para sua eficácia. Isso se deve à natureza essencialmente física de sua ação (MIDDLEMISS et al., 1985).

Soluções de detergente com temperaturas elevadas possibilitam acelerar o processo de remoção de resíduos, por diminuir as forças de ligação entre os resíduos e a superfície, e aumentar tanto a velocidade das reações, como a solubilidade de compostos solúveis. Concomitantemente, acarreta, também, diminuição da viscosidade dos fluidos, o que remete a uma maior turbulência no escoamento e conseqüente maior ação mecânica na limpeza, condição essa fundamental para uma elevação na eficiência em sistemas de limpeza automáticos (FORSYTHE e HAYES, 2002; LEITÃO, 1975).

A fusão das gorduras, que ocorre a temperaturas superiores a 35-37°C, faz com que a utilização de temperaturas mais elevadas também propicie uma maior eficácia na ação do detergente nessas condições (Middlemiss et al., 1985). Entretanto é importante observar que cada detergente tem sua temperatura ótima de ação que deve ser monitorada durante o processo de aplicação. A velocidade de remoção de sujidade aumenta, em média, 1,5 vezes a cada 10°C de aumento da temperatura. Porém temperaturas superiores à faixa de 43°C a 54°C dificilmente são utilizadas, pois podem

provocar a desnaturação proteica, efeito este que dificulta a sua remoção (KUNIGK, 1998; LEITÃO, 1975).

Outro parâmetro operacional que deve ser observado é o tempo de contato entre sujidades e as soluções de detergente. Existem tempos mínimos e ótimos de ação (Andrade e Macedo, 1996). Estudos realizados mostram que o tempo de contato pode ser reduzido com a utilização de maiores concentrações de detergente ou se for aplicada maior ação cisalhante (Kunigk, 1998). É importante salientar que tempos mínimos devem ser adequadamente avaliados para garantir uma adequada ação dos componentes químicos (FRYER et al., 2006).

O uso da correta concentração dos detergentes em solução é citado por Parkar et al. (2003). Estudos realizados por esses autores demonstraram que ao diminuir a concentração dos agentes de limpeza pela metade, houve morte das células em quantidade semelhante à alcançada com a concentração original. Porém houve ineficiência na remoção de todas as células e resíduos da superfície. Para Marshall (1994) os resíduos proporcionados pelas células mortas tornam-se locais aptos para a instalação de novas células ou materiais orgânicos, resultando numa formação mais rápida de biofilme posteriormente.

Porém outros estudos mencionados por Fryer et al. (2006) demonstram que um aumento não criterioso na concentração de detergente pode ocasionar maior dificuldade na remoção de sujidades. De acordo com Gallot-Lavallee et al. (1984) isso ocorre devido à dificuldade que o detergente tem em penetrar no resíduo, proporcionada pelo aumento da viscosidade da solução.

Além dos três fatores citados anteriormente (tempo de contato, temperatura e concentração do detergente), a remoção de sujidades de um equipamento deve contar com ação mecânica, que decompõe a sujidade e colabora na sua remoção das superfícies (ANDRADE e MACEDO, 1996).

A energia mecânica é aplicada através de fricção, na qual forças de cisalhamento atuam sobre a superfície do equipamento. As forças de cisalhamento atuarão de forma mais intensa, quanto maior for a taxa de escoamento; porém, 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).

Outro parâmetro utilizado para dimensionar a energia mecânica aplicada no processo de higienização é o número de Reynolds. Estudos realizados por Gallot-Lavallee et al. (1984) determinam que qualquer aumento na taxa de escoamento, resultando em valores de Reynolds entre 10.000 e 70.000, implica em aumento na eficácia do processo de limpeza.

O fato de todos os parâmetros operacionais serem bem executados não remeterá em um adequado processo de higienização se o detergente utilizado não for o apropriado para a remoção de um determinado tipo de resíduo. Por isso é importante o conhecimento da composição do detergente que será utilizado.

Os detergentes contêm, em sua formulação, diversos compostos químicos que agem sobre os resíduos de diferentes maneiras. Estes podem ser divididos em (SCHMIDT, 1997):

- i) Compostos fisicamente ativos, que alteram a solubilidade e a estabilidade coloidal do resíduo;
- ii) Compostos quimicamente ativos, que modificam os componentes dos resíduos tornando-os mais solúveis e, conseqüentemente, mais fáceis de serem removidos.

Dentre os componentes fisicamente ativos estão os surfactantes (tensoativos) que possuem em sua estrutura uma porção hidrofílica e outra hidrofóbica. Agem emulsionando<sup>3</sup>, penetrando, dispersando<sup>4</sup> e umidificando<sup>5</sup> os resíduos (SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975; REED, 1992).

Dentre os componentes quimicamente ativos podem ser citados agentes

---

<sup>3</sup> “Reação com óleo e gordura, transformando-os em pequenas partículas que permanecem em suspensão coloidal na solução de detergente” (Leitão, 1975, p. 8). A emulsão evita a aglomeração das partículas que permanecem em suspensão por um longo período de tempo (REED, 1992).

<sup>4</sup> “Propriedade que caracteriza a desagregação de agregados de resíduos em minúsculas partículas individuais, as quais são facilmente suspensas e removidas dos equipamentos” (LEITÃO, 1975, p. 7; REED, 1992).

<sup>5</sup> “Propriedade de reduzir a tensão superficial do meio aquoso, de forma a aumentar sua capacidade de penetração em resíduos” (LEITÃO, 1975, p. 8).

sequestrantes<sup>6</sup>, como tripolifosfato de sódio, organo-fosfatos e EDTA, que formam complexos solúveis com cálcio e magnésio que gerariam depósitos minerais (SCHMIDT, 1997; TURNER, 1982; REED, 1992; GIESE, 1991).

Nenhuma substância simples possui todas essas propriedades. Então, para cada necessidade de operação de higienização, são realizadas formulações específicas que atendam às demandas do processo (GIESE, 1991).

Os ingredientes quimicamente ativos mais importantes subdividem os detergentes utilizados nas limpezas que utilizam o sistema CIP em duas classes: alcalinos e ácidos (SCHMIDT, 1997).

#### 2.4.2.1 *Detergentes alcalinos*

As soluções alcalinas<sup>7</sup> são utilizadas por serem eficientes na remoção de gorduras, proteínas, carboidratos e na diminuição da carga microbiana (ANDRADE e MACEDO, 1996; SCHMIDT, 1997; JEURNINK e BRINKMAN, 1994; GIESE, 1991).

Em gorduras os detergentes alcalinos agem através da ação emulsificante ou de saponificante<sup>8</sup> de seus ingredientes (Schmidt, 1997; Leitão, 1975). Em proteínas, agem principalmente através da quebra de sua estrutura em porções menores (peptização) ou por solubilização (MIDDLEMISS et al., 1985).

Na remoção de gorduras, tempos menores de processo podem ser mais efetivos que longos tempos, pois neste último caso pode haver coalescência e redeposição (MIDDLEMISS et al., 1985).

Por sua vez, as proteínas encontradas na indústria de alimentos caracterizam-se por serem os resíduos sólidos de maior dificuldade para remoção. Como comprovação cita-se o fato de que a caseína (principal proteína do leite) é utilizada por suas propriedades adesivas em colas e tintas. Quando desnaturadas, as proteínas apresentam maior nível de dificuldade em sua remoção, necessitando que os

---

<sup>6</sup> “Propriedade de evitar a deposição de sais minerais indesejáveis nas superfícies em limpeza, usualmente pela formação de quelatos” (Leitão, 1975, p. 9). Quelatos são complexos solúveis e estáveis, com uma típica estrutura de anel (REED, 1992).

<sup>7</sup> Alcalinos são agentes químicos que em solução liberam íons hidroxila, propiciando pH superior a 7,0.

<sup>8</sup> “Propriedade do detergente de reagir com gorduras, causando sua saponificação, ou seja, transformação em sabões, que são removidos” (Leitão, 1975, p. 9). A reação básica é: gordura + NaOH = sabão + glicerol (REED, 1992).

detergentes alcalinos tenham em sua formulação agentes peptizantes<sup>9</sup> ou dissolvedores<sup>10</sup> (SCHMIDT, 1997).

As camadas formadoras dos resíduos são removidas em ordem inversa a sua deposição (Middlemiss et al., 1985). De acordo com Grasshoff (1988 apud Jeurnink e Brinkman, 1994) o processo de remoção de resíduos de leite se dá por um prévio inchamento das camadas superiores após contato com detergente alcalino, seguido de sua remoção. O inchamento é justificado pela quebra de algumas ligações entre os resíduos ou de um aumento na repulsão entre as moléculas componentes, causado pelo elevado pH da solução alcalina. Rachaduras surgem nas estruturas, facilitando ainda mais a penetração do agente de limpeza (Jeurnink e Binkman, 1994). As camadas remanescentes, constituídas principalmente por minerais, são removidas pela ação de detergente ácido que deverá ser adicionado posteriormente.

Dessa maneira é importante conhecer esses dois tipos de detergente para que sua utilização seja otimizada. Os detergentes alcalinos são classificados em (SCHMIDT, 1997; REED, 1992):

- i) Detergente de alta alcalinidade<sup>11</sup>: NaOH ou KOH. Apresentam grande capacidade de saponificar gorduras. Possuem pH superior a 13 e são utilizados para remoção de sujidades mais incrustadas, derivadas de processos nos quais elevadas temperaturas foram utilizadas (GIESE, 1991);
- ii) Detergente de moderada alcalinidade: De acordo com Giese (1991) detergente com moderada alcalinidade 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 sendo utilizado principalmente na lavagem manual das superfícies.

---

<sup>9</sup> "Propriedade de reagir e dispersar proteínas, havendo formação de soluções coloidais, parcialmente solúveis" (LEITÃO, 1975, p.8; REED, 1992).

<sup>10</sup> "Ação pela qual partículas insolúveis de resíduos reagem quimicamente com os agentes de limpeza, dando produtos solúveis em água" (Leitão, 1975, p.9). Exemplo desse fenômeno é a reação de um agente alcalino com ácido que resulta em um produto solúvel em água (REED, 1992).

<sup>11</sup> Medida da quantidade de álcalis em uma solução (REED, 1992).



O álcali mais utilizado em equipamentos como trocadores de calor e concentradores é o hidróxido de sódio que se caracteriza por ser o mais barato dos agentes alcalinos e possuir grande capacidade de remover proteínas e gorduras, além de não provocar a corrosão do aço inoxidável (Andrade e Macedo, 1996; Turner, 1982). O principal inconveniente da utilização do hidróxido de sódio (NaOH) é sua baixa molhabilidade que poderá ser melhorada com a adição de um tensoativo na composição do detergente (TURNER, 1982).

Independente de sua classificação, as soluções alcalinas devem ser utilizadas a uma temperatura superior que a do aquecimento do produto (BARNARD et al., 1992).

A concentração utilizada de detergente alcalino é dependente do resíduo a ser removido e da alcalinidade ativa do composto. A alcalinidade ativa de um composto, expressa em  $\text{Na}_2\text{O}$ , é um importante indicador do valor do detergente no processo de limpeza, pois parte dela é usada para a remoção dos resíduos, através das ações citadas anteriormente, e outra parte é utilizada para neutralização dos agentes ácidos presentes nos mesmos (LEITÃO, 1975).

É citada por Stemerding e Brinkman (1990) apud Jeurnink e Brinkman (1994) a existência de detergentes alcalinos com componentes sequestrantes em sua composição para a remoção, por estes, dos resíduos minerais, dispensando, algumas vezes, a utilização de detergentes ácidos.

#### *2.4.2.2 Detergentes ácidos*

Os detergentes ácidos são utilizados na remoção de resíduos minerais por transformar os sais insolúveis em água em compostos solúveis (SCHMIDT, 1997; JEURNINK e BRINKMAN, 1994). Essas formulações podem conter ácidos orgânicos, como os ácidos glucônico e cítrico, ou inorgânicos, como o sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), clorídrico (HCl), fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) e nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) (ANDRADE e MACEDO, 1996; SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975).

Como no caso dos detergentes alcalinos, os detergentes ácidos possuem sua concentração de utilização dependente do resíduo a ser removido, e a concentração baseada em sua acidez ativa (LEITÃO, 1975).

É de fundamental importância o conhecimento, pelos operadores do processo,

da função de cada agente utilizado e o momento de sua correta utilização. O uso inapropriado do detergente pode dificultar a remoção de resíduos. A utilização de agentes ácidos antes da completa remoção dos resíduos orgânicos, por exemplo, pode precipitar proteínas (SCHMIDT, 1997; LEITÃO, 1975). Para evitar equívocos é necessário o estabelecimento de um procedimento escrito com quantidades, produtos, tempos e temperaturas envolvidos no processo (BARNARD et al., 1992). Outro aspecto importante é a composição da água utilizada nos enxágues e no preparo das soluções. Ao utilizar-se água com dureza elevada, pode ocorrer a precipitação de carbonato de cálcio ou de magnésio quando a água for aquecida ou alcalinizada e, desta forma, a higienização do equipamento ficará comprometida.

#### *2.4.3 Enxágue*

Etapa que tem por objetivo a remoção dos resíduos suspensos pela ação do detergente através da utilização de água, evitando que ocorra nova deposição durante a secagem, e eliminar as frações residuais das soluções de detergentes aplicadas anteriormente (ANDRADE e MACEDO, 1996; FRYER et al., 2006).

Qualquer detergente deixado no sistema após o processo de lavagem pode contaminar o produto, alterando suas características organolépticas, devendo ser considerado como um aditivo incidental (KUNIGK, 1998).

Por ser um processo exclusivamente físico, os fatores envolvidos neste processo são vazão e temperatura da água utilizada. A vazão de escoamento interfere no cisalhamento aplicado sobre a superfície a ser higienizada, enquanto a temperatura na solubilidade dos resíduos.

#### *2.4.4 Sanitização*

Esta etapa do processo de higienização tem por objetivo a eliminação de microrganismos patogênicos e a redução do número de microrganismos deterioradores até níveis considerados seguros (ANDRADE e MACEDO, 1996; LEITÃO, 1975; REED, 1992). As formas de microrganismos não patogênicos mais resistentes que sobreviverem sobre as superfícies não devem afetar a qualidade dos alimentos nem

tampouco dificultar sanitizações posteriores (FORSYTHE; HAYES, 2002).

Resíduos orgânicos, que porventura não forem removidos nas etapas anteriores, além de proteger os microrganismos da ação do sanitizante, atuam como fonte de nutrientes (ANDRADE e MACEDO, 1996). De acordo com Schmidt (1997), o resíduo sólido reduz a atividade do agente sanitizante, podendo até inativá-lo. Para Giese (1991): “Não se pode sanitizar uma superfície suja”.

Outro aspecto importante reforça a proposição de necessidade da ausência de resíduos remanescentes ao início dessa etapa. A presença de rachaduras nos resíduos pode servir de depósito de microrganismos. Como a ação do sanitizante depende do contato com o microrganismo, pode haver prejuízo na sua efetividade (SCHMIDT, 1997).

A sanitização deve ser realizada imediatamente antes do uso do equipamento, sendo importante observar que não elimina eventuais falhas de etapas anteriores (ANDRADE e MACEDO, 1996).

Pode ser realizada, como já citado, 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 vapor apresenta aplicação limitada, pois gera custos mais elevados, se comparada com a utilização de água quente, e é de difícil operação, pois o tempo e temperaturas de contato são de complexo monitoramento (SCHMIDT, 1997; TURNER, 1982). As condições de processo variam de 77°C durante 15 minutos a 93°C durante 5 minutos de contato (LEITÃO, 1975).

O sistema com utilização de água quente pode ser realizado na forma de imersão, spray ou circulação de água. Custo 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.

As desvantagens relacionadas com a utilização do calor na sanitização são: 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). Giese (1991) ressalta, ainda que alguns esporos bacterianos podem sobreviver à temperatura de ebulição por mais de uma hora e se a água utilizada for dura, pode ocorrer a precipitação de carbonatos. Para o caso de equipamentos de processamento de alimentos deve-se utilizar água a 77°C durante 5 minutos (LEITÃO, 1975).

Os sanitizantes químicos devem apresentar algumas propriedades para que sejam utilizados em um equipamento, como: 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).

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).

Os sanitizantes à base de cloro (cloro líquido, hipocloritos, cloroaminas inorgânicas e orgânicas) são os mais utilizados pelas indústrias de alimentos no Brasil 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).

Temperaturas e concentrações elevadas, longos tempos de contato e redução do pH da solução sanitizante permitem uma maior eficiência na sanitização por compostos clorados. Porém, qualquer situação de abuso nestas condições, pode propiciar aumento das taxas de corrosão, mesmo em aço inoxidável. Condições ideais, portanto, devem ser determinadas. Segundo Turner (1982), a concentração máxima recomendada é 200 mg.L<sup>-1</sup> de cloro livre e segundo Andrade e Macedo (1996) e

Schmidt (1997), quando esses compostos são utilizados em circulação os parâmetros adotados são: pH entre 7,5 e 8,5, temperatura de 20 a 25°C e contato de 15 a 30 minutos.

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). Por isso é de fundamental importância que a superfície seja adequadamente enxaguada antes da utilização do sanitizante.

Para verificação da eficiência de um sanitizante, o teste Chambers é utilizado, no qual se deve atingir uma redução de 99,999% da população de *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* a 20°C após 30 segundos de aplicação do produto na concentração de uso (GIESE, 1991).

#### 2.4.5 Enxágue

Etapa realizada com a passagem de água para a retirada de compostos sanitizantes, caso seja necessário.

### 2.5 Sistemas de Higienização

A seleção da metodologia a ser empregada em um sistema de higienização depende do tipo de operação e de resíduo que deverá ser removido. Os sistemas de higienização podem ser realizados manualmente, por imersão, aspersão ou pelo sistema clean-in-place (LEITÃO, 1975; GIESE, 1991).

O sistema manual caracteriza-se pelo uso de detergentes pré-selecionados, a temperaturas 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. As escovas devem ser de material sintético resistente ao calor, ao produto químico e à umidade (GIESE, 1991).

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 durante 15 a 30 minutos à temperatura de 52°C. Ao final do processo são escovados e

lavados com água a 82°C.

De acordo com Giese (1991) antes de ser desmontado, todo o equipamento deve sofrer uma pré-lavagem para remoção dos resíduos grosseiros das superfícies. Posteriormente as partes desmontadas são colocadas em tanques com recirculação para higienização. Os tempos envolvidos são de 30 a 40 minutos para lavagem com detergente alcalino e de 5 a 10 minutos para a utilização do detergente ácido.

O sistema de aspensão é utilizado para limpeza de interiores de tanques principalmente de equipamentos de difícil acesso como, por exemplo, esteiras transportadoras.

A higienização pelo sistema clean-in-place (CIP) 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).

Este processo de higienização apresenta um custo inicial mais elevado, porém 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 são 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 a serem estudados neste sistema, que garantem a eficiência no processo são, basicamente: o tempo, a temperatura, a concentração dos agentes de limpeza e o grau de turbulência do escoamento (Turner, 1982; Reinemann e Rabotski, 1993). Desses parâmetros, os três primeiros são interdependentes, podendo-se aumentar qualquer um dos fatores com o objetivo de se reduzir os outros.

Em combinação com tempo, temperatura e concentração dos agentes de limpeza, 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. Como recomendação, aconselha-se escoar as soluções com aumento de 1/3 em relação aos níveis normais de escoamento do produto alimentício em trocadores de calor e tubulações (TURNER, 1982).

Para aumentar o nível de turbulência do escoamento, com aumento de dez a vinte vezes na tensão de cisalhamento aplicada à superfície, tem-se implementado a utilização de injeção de ar em conjunto com as soluções, aumentando, dessa forma, a velocidade de circulação e a ação mecânica do processo (WONG, 1998).

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 de pré-lavagem e de enxágue deve ser corretamente estimado, pois o reduzindo em demasia, pode-se ter uma ineficiente remoção de resíduos e de detergente. Por outro lado, se for aumentado em demasia, geram-se grandes volumes de efluentes, acarretando maiores custos para a empresa (KUNIGK, 1998).

Sistemas CIP modernos são controlados através de softwares que regulam automaticamente as concentrações, as temperaturas das soluções e suas taxas de escoamento. Registram o processo através da utilização de gráficos e interrompem-no, sempre que algum desvio ao previamente programado ocorrer (Honer, 1992). Contudo, de acordo com Fryer; Christian e Liu (2006), esses processos são altamente desenvolvidos e automatizados, porém raramente otimizados.

De acordo com Bakka (1991, apud Giese, 1991) existem três sistemas diferenciados de CIP: 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. 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. De acordo com o mesmo autor, apesar de os sistemas de recirculação possuírem um custo inicial elevado, apresentam um custo operacional menor que o de tanque único, pois se recuperam não apenas as soluções, mas, também, parte da energia térmica que porventura possa ser utilizada.

O maior problema gerado com processos CIP é a redução de responsabilidade por parte dos operadores não treinados, acarretando não conformidades no processo. Segundo Turner (1982), em sistemas manuais de higienização a rotina de trabalho inclui uma observação contínua das condições higiênicas das partes desmontadas nos equipamentos. Enquanto que em sistemas CIP, a obrigação do operador, muitas vezes em sua opinião, é apenas acionar o botão de início do processo. É importante observar, também, o relatado por Wong (1998) de que microrganismos podem permanecer na superfície higienizada mesmo após processos CIP serem realizados.

A falta de cuidado ao realizar procedimentos de higienização periódicos pode originar problemas de incrustações que são potencializados em indústrias onde o sistema CIP está instalado. De acordo com Turner (1982) se por algum motivo, um equipamento fica sem a rotina de limpeza, a quantidade de resíduos, devido às produções realizadas, aumenta, o que dificultará a sua remoção, além de necessitar de concentrações mais elevadas de detergente futuramente.

É importante destacar que mesmo com o sistema CIP implantado na indústria, algumas partes do sistema devem ser higienizadas manualmente como estruturas presentes em tanques tais como agitadores, gaxetas, coletores de amostras, válvulas e em envasadoras como copos e pistões, correntes de movimentação e calefatores (BARNARD; IVKOVICH, CAULLER, 1992).



## **2.6 Sistemas de controle tipicamente empregados em sistemas CIP**

A sequência do processo CIP pode ser realizada tanto manualmente como automaticamente. A automação do processo tem vantagens e desvantagens sobre o processo manual. Marriot (1994) apresenta as seguintes vantagens do processo automatizado em relação ao processo manual:

- i)* Confiabilidade de que todas as etapas foram realmente cumpridas;
- ii)* Confiabilidade de que os tempos das etapas foram obedecidos;
- iii)* Possibilidade de 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 higienizados imediatamente após o uso permitindo nova batelada ser iniciada.

Outra vantagem segundo Hardwick (1995) é a de que os sistemas CIP, sendo fechados, facilitam o combate aos micro-organismos presentes no ar, no solo e na matéria prima.

Dentre as desvantagens apresentadas pelo processo automatizado, pode-se citar (Marriot, 1994):

- i)* Custo de implantação devido ao fato de que cada sistema tem características
- ii)* próprias que necessitam de projeto e equipamentos “customizados”;
- iii)* Custo de manutenção é mais elevado devido à sofisticação do equipamento;
- iv)* Falta de flexibilidade no sistema caso haja variações nos equipamentos ou produtos a serem processados;

Os primeiros sistemas CIP eram automatizados com o uso de relés montados em painéis. Os maiores inconvenientes a este tipo de tecnologia eram:

- i)* Grande espaço requerido;
- ii)* Dificuldades de ajuste dos tempos de processo;
- iii)* Dificuldade de alteração da lógica do processo;

- iv) Elevado consumo de energia;
- v) Elevado nível de ruído;
- vi) Difícil localização de defeitos.

O grande avanço na automação de sistemas CIP está baseado no Controlador Lógico Programável (CLP) que é apresentado na Figura 2.1. Este equipamento eletrônico substituiu com grande vantagem os painéis de relés eliminando todos os problemas que estes apresentavam. Adicionalmente quando interligados com uma interface homem-máquina adequada, tal como um computador usado para monitoração do processo, mostram ao operador o comportamento global do processo em tempo real, incluindo registro de alarmes e eventos.



Figura 2.1 – Controladores Lógicos Programáveis Fonte: Rockwell

Segundo o fabricante KHS – Ziemann-Lies, um **sistema de limpeza CIP típico** é constituído por:

- 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) Condutivímetro;
- vii) Controlador e indicador de temperatura;
- viii) Válvula de controle automático e

ix) Válvulas solenóides.

Ainda segundo o fabricante citado, para processos mais complexos podem ser utilizados tanques de solução sanitizante fria (à base de cloro) e de água tratada fria.

O processo de limpeza CIP pode ser executado tanto de forma manual como de forma automática. Nos processos executados de 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, temperaturas e concentrações. Nos processos executados de forma automática, é tipicamente empregado um CLP 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.

Na sequência será apresentado, de forma simplificada, um sistema CIP composto por três tanques e as etapas típicas que este deve atender conforme o fabricante KHS - Ziemann-Lies.

A primeira etapa consiste no pré-enxágue do equipamento do processo com água recuperada proveniente do tanque de água recuperada. Esta pré-lavagem visa remover do equipamento do processo, e também das tubulações, todo material sólido porventura existente e/ou líquidos residuais que ainda permanecem no equipamento do processo e nas tubulações. Adicionalmente, é executado o pré-aquecimento desta água de pré-enxágue 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-enxágue efluente do equipamento do processo é descartada. A Figura 2.2 ilustra esta etapa do processo.

A segunda etapa consiste na limpeza do equipamento do processo com uma solução de soda cáustica proveniente do tanque de soda quente. Nesta etapa, uma solução de soda cáustica (detergente) previamente preparada é encaminhada ao equipamento de processo para a limpeza do mesmo. Esta solução é aquecida até a temperatura adequada de trabalho (85 °C) e é feita escoar através do processo em circuito fechado, retornando ao tanque de soda quente. A Figura 2.3 ilustra esta etapa

do processo.

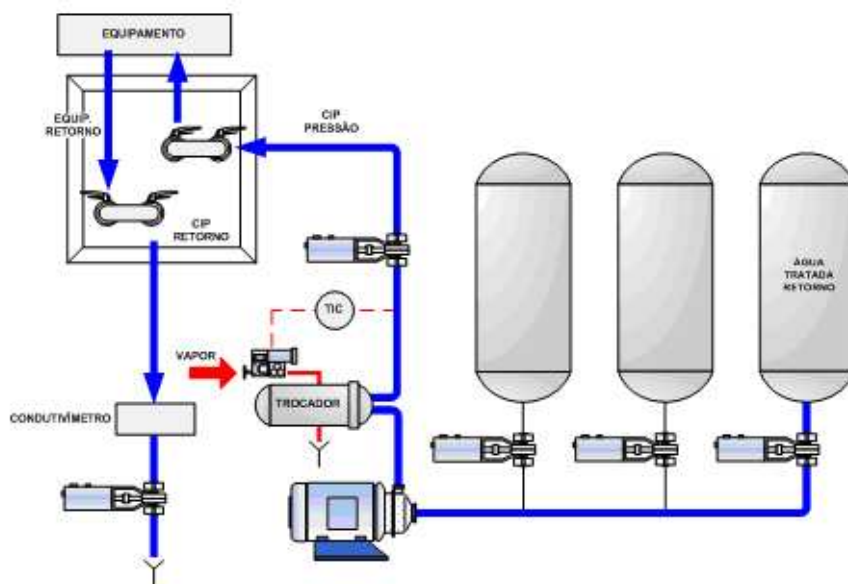


Figura 2.2 – Pré-enxágue do sistema em estudo com água recuperada Fonte: KHS – Ziemann Lies

A terceira etapa consiste no enxágue intermediário com água tratada proveniente da rede de utilidades. Tipicamente, esta água de enxágue intermediário é pré-aquecida a 50 °C com o objetivo de manter aquecido todo o circuito a ser limpo. A etapa de enxágue intermediário visa remover o detergente (solução de soda cáustica) do sistema. A água de enxágue efluente do equipamento de processo é feita retornar ao tanque de água recuperada, sendo a duração desta etapa definida pela condutividade elétrica 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 2.4 ilustra esta etapa do processo.

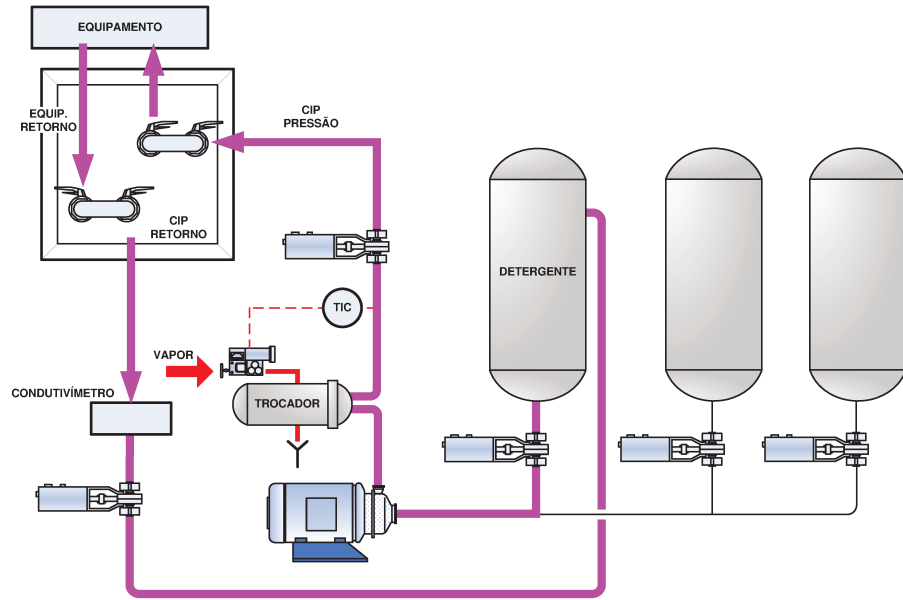


Figura 2.3 – Limpeza do sistema em estudo com solução de soda cáustica Fonte: KHS – Ziemann Lies

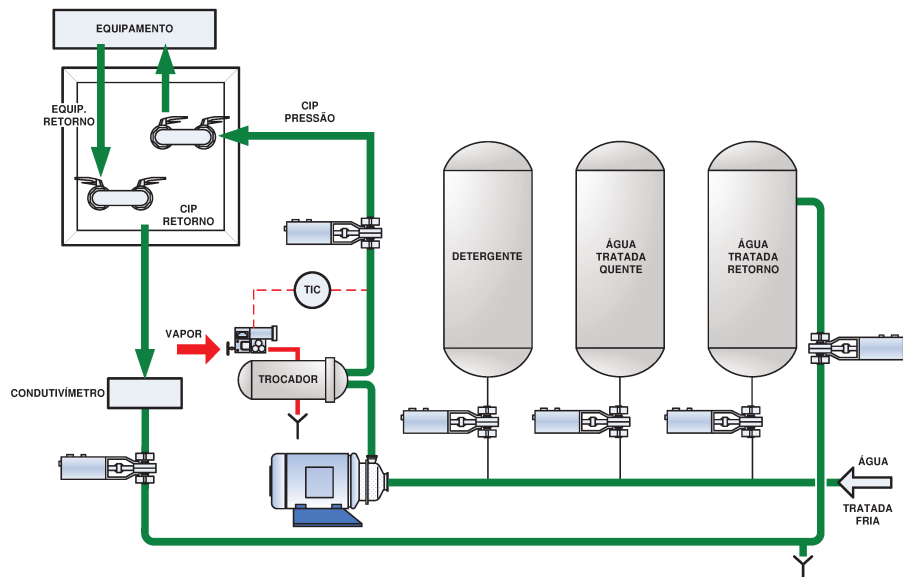


Figura 2.4 – Enxágue intermediário do sistema em estudo com água tratada Fonte: KHS – Ziemann Lies

A quarta etapa consiste na esterilização do equipamento do processo com o emprego de água quente proveniente do tanque de água quente. Tipicamente, esta água de esterilização do equipamento deve ser pré-aquecida a 90°C e feita circular através do equipamento em circuito fechado durante, pelo menos, 15 minutos. A Figura 2.5 ilustra esta etapa do processo.

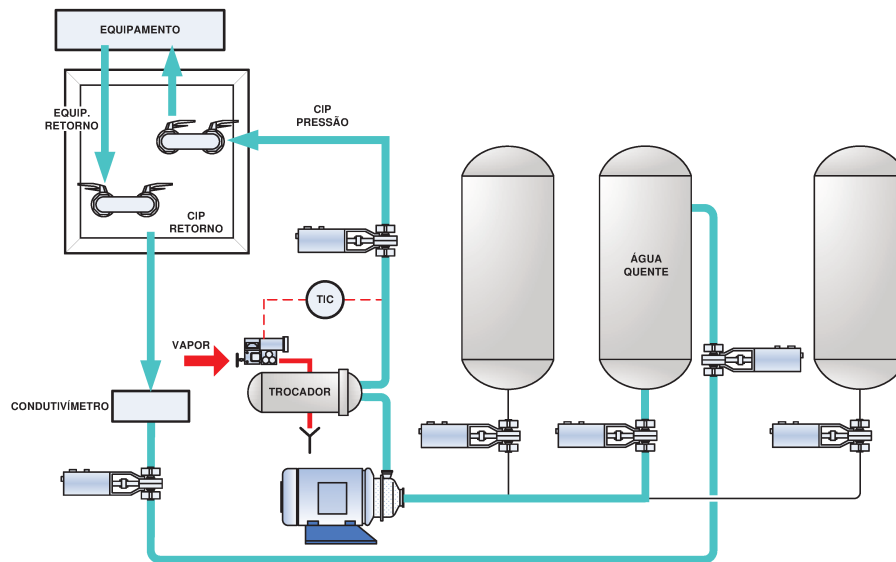


Figura 2.5 – Esterilização do sistema em estudo com água quente Fonte: KHS – Ziemann Lies

A quinta etapa consiste no enxágue final do equipamento de processo com água tratada proveniente da rede de utilidades. Tipicamente, esta água de enxágue final 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. A água tratada efluente do equipamento do processo pode ser direcionada ao tanque de água recuperada ou descartada para dreno. A Figura 2.6 ilustra esta etapa do processo.

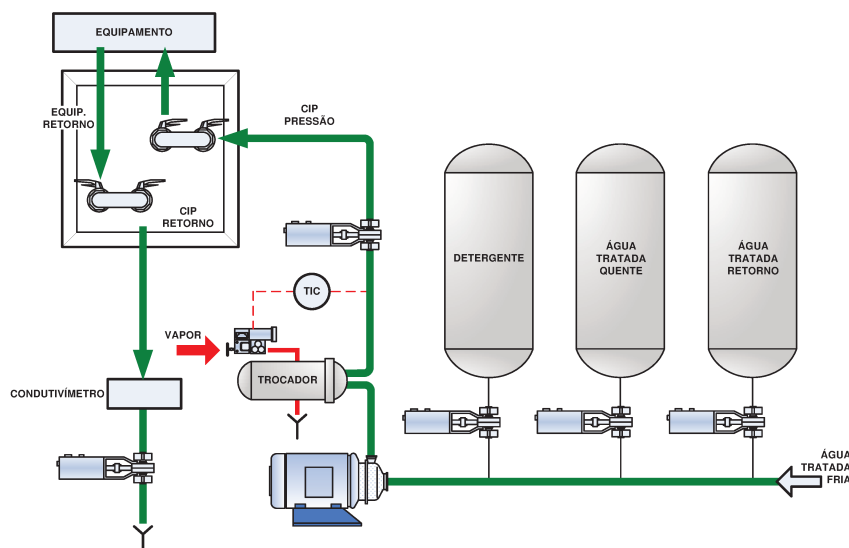


Figura 2.6 – Resfriamento do sistema em estudo com água tratada proveniente da rede Fonte: KHS – Ziemann Lies

Gormezano (2007) desenvolveu estudo experimental em protótipo de sistema CIP visando identificar a função de transferência que representa o comportamento dinâmico da variável de processo concentração de resíduos presentes na solução de agente sanificante em função da vazão de operação do mesmo. O estudo foi baseado na metodologia proposta por CHEN et al. (2004).

De acordo com Gormezano (2007), as equações que representam as correlações obtidas a partir dos dados experimentais para a cinética de remoção dos depósitos de proteína de leite foram obtidas por meio do emprego do aplicativo ORIGIN 6.0<sup>®</sup> MICROCAL<sup>®</sup>. A equação (2.1) representa a cinética da remoção da proteína de leite empregando o procedimento convencional com vazão de 2,5 L.min<sup>-1</sup> e a equação (2.2) com vazão de 3,0 L.min<sup>-1</sup>.

$$\beta = 0,90177 \cdot e^{-\left(\frac{t}{48,00072}\right)} + 0,21982 \cdot e^{-\left(\frac{t}{1265,07095}\right)} - 0,12131 \quad (2.1)$$

$$R^2 = 0,9994$$

$$\beta = 0,90000 \cdot e^{-\left(\frac{t}{16,7234}\right)} + 0,09987 \cdot e^{-\left(\frac{t}{163,42948}\right)} \quad (2.2)$$

$$R^2 = 0,9998$$

Nas equações anteriores  $\beta$  representa a razão entre a absorbância instantânea e aquela avaliada no instante inicial e  $t$  representa o tempo em segundos.

Ainda de acordo com o autor anteriormente citado, considerando o emprego de procedimento com eletrólise, as equações (2.3) e (2.4) representam a cinética de remoção dos depósitos de proteína de leite para as vazões de 2,5 L.min<sup>-1</sup> e 3,0 L.min<sup>-1</sup> respectivamente.

$$\beta = 0,714 \cdot e^{-\left(\frac{t}{10,78144}\right)} + 0,28306 \cdot e^{-\left(\frac{t}{170,86603}\right)} + 0,00301 \quad (2.3)$$

$$R^2 = 0,9994$$

$$\beta = 0,97364 \cdot e^{-\left(\frac{t}{14,45006}\right)} + 0,02635 \cdot e^{-\left(\frac{t}{182,0334}\right)} \quad (2.4)$$

$$R^2 = 0,99999$$

As equações de correlação apresentadas anteriormente possuem dois termos exponenciais que são os responsáveis pelos ajustes das funções conseguidas. O primeiro é muito importante e representa o comportamento da concentração de leite no início do processo e o segundo é o responsável pelo estágio subsequente da curva de decaimento da concentração de leite.

## **2.7 Modelagem matemática e identificação de sistemas**

O conhecimento do comportamento dinâmico de um sistema é fundamental para o seu correto controle. O modelo matemático que representa um sistema está intimamente relacionado com o seu comportamento dinâmico. Neste contexto, o conhecimento do modelo de um processo industrial deve ser tratado com muita atenção. Zhui (2001) afirma que um modelo apresentado na forma de resposta ao impulso é chamado de modelo não paramétrico, ao passo que um modelo no formato de equação diferencial ou função de transferência é chamado de modelo paramétrico.

A identificação não paramétrica do comportamento dinâmico de processos industriais apresenta a vantagem da facilidade de obtenção dos dados de processo e posteriormente da obtenção de modelos aproximados, de baixa ordem, para a grande maioria dos processos industriais (AGUIRRE, 2000).

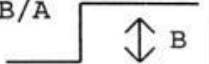



A identificação não paramétrica emprega basicamente as curvas de resposta do processo quando excitados por sinais de entrada do tipo degrau, impulso ou senoidal. A partir dessas curvas, pode-se extrair modelos aproximados, de baixa ordem, que descrevam o comportamento dinâmico do processo (AGUIRRE, 2000). Esses modelos são pouco precisos, mas podem ser suficientes para se ter uma ideia do comportamento do processo e podem ser usados para efetuar a pré-sintonia de controladores PID, por exemplo. Adicionalmente, ele permite entender o comportamento do processo durante situações que envolvam transientes ou ainda para analisar o desempenho de um sistema de controle agindo sobre o processo.



A entrada normalmente mais usada para identificar, de forma não paramétrica, um processo industrial é a excitação em degrau (AGUIRRE, 2000). Esses ensaios normalmente permitem gerar, graficamente, modelos empíricos dinâmicos representados por uma função de transferência de baixa ordem (1ª ou 2ª ordem, eventualmente incluindo um atraso de transporte) com, no máximo, quatro parâmetros a serem determinados experimentalmente.

Åström e Hägglung (1995) afirmam que muitos dos processos podem ser representados de forma aproximada, pela combinação de quatro elementos tipicamente encontrados em processos industriais, a saber: (i)- ganho, (ii)- atraso de transporte, (iii)- atraso de transferência e (iv)-elemento integrador. São apresentadas na Tabela 2.1 as principais características destes elementos.

Tabela 2.1 – Principais elementos de processo

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	$y(t) = 0, t < \theta$ $y(t) = u(t - \theta), t \geq \theta$ 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: $y(t) = A \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \cdot H(t)$	$\frac{1}{\tau \cdot s + 1}$	
INTEGRADOR	$\frac{dy}{dt} = \frac{u}{C}$ Para entrada em degrau: $y(t) = (A/C) \cdot t \cdot H(t)$	$\frac{1}{C \cdot s}$	$\text{tg } \alpha = A/C$ 

A curva de resposta de um sistema estável de ordem superior pode ser expressa como a soma de certo número de curvas exponenciais e curvas senoidais amortecidas. Uma característica particular de tais curvas de resposta é que pequenas oscilações são superpostas em oscilações maiores ou sobre curvas exponenciais. Componentes que

apresentam decaimento rápido têm significado somente na parte inicial da resposta transitória.

Outra abordagem é a dos sistemas inteligentes. Os chamados “sistemas inteligentes” são aqueles que fornecem respostas que solucionam problemas, tais respostas apropriadas às situações específicas destes problemas, mesmo que sejam novas ou inesperadas, fazendo com que tal comportamento seja “único” ou até mesmo considerado “criativo” (SIMÕES e SHAW, 2007).

Um aspecto relevante na forma de pensar dos seres humanos é a implicação lógica, que consiste na formulação de uma conexão entre causa e efeito, ou uma condição e sua consequência.

A lógica *fuzzy* é muito parecida com o pensamento e a linguagem do ser humano do que os sistemas lógicos tradicionais. Basicamente, ela fornece um meio eficaz de capturar a natureza aproximada e inexata do mundo real (LEE, 1990).

Tem-se como propriedade fundamental da lógica convencional, ou booleana, que a função de pertinência é bivalente. Na lógica *fuzzy* a função de pertinência  $\mu_A(x)$  tem todos os valores dentro do intervalo [0,1]. Isso significa que um elemento pode ser membro parcialmente de um conjunto, indicado por um valor fracionário dentro do intervalo numérico (SIMÕES e SHAW, 2007).

Segundo os mesmos autores, diferentemente da modelagem convencional, onde se identifica o comportamento dinâmico do processo, na identificação de sistemas *fuzzy* (ou *Neuro-Fuzzy*) há identificação da estrutura e dos parâmetros, ou seja, o comportamento de entrada e saída que o aproxime do sistema dinâmico que está sendo modelado.

A identificação de sistemas *fuzzy* tem sido utilizada para modelar processos complexos, não lineares e vagos a partir das entradas e saídas do modelo; esta, combinada com métodos de redes neurais artificiais, dá origem a um sistema classificado como híbrido. Deste modo, os sistemas *neuro-fuzzy* combinam a capacidade de aprendizado das redes neurais artificiais, através de dados de treinamento, com o poder de interpretação linguístico dos sistemas de inferência *fuzzy*.

### 2.7.1 Modelagem aproximada de 1ª ordem com atraso de transporte

A aproximação de sistemas superamortecidos de ordem 2 ou superior por atraso de transferência mais atraso de transporte pode ser representada pela função de transferência apresentada na equação (2.5) (AGUIRRE, 2000).

$$G(s) = \frac{K.e^{-\theta.s}}{1 + \tau.s} \quad (2.5)$$

O atraso de transporte é incluído para considerar os elementos de ordem mais alta que não devem ser desprezados.

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 (2.6).

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_{\infty}}{A} \quad (2.6)$$

Existem diversos métodos de se determinar os parâmetros  $\theta$  e  $\tau$  do modelo representado por um sistema de 1ª ordem mais atraso de transporte, a saber: (i)- Método da Tangente, (ii)- Método de Miller, (iii)- Método de Smith e (iv)- Método de Sundaresan e Krishnaswamy.

No Método da Tangente 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 2.7.

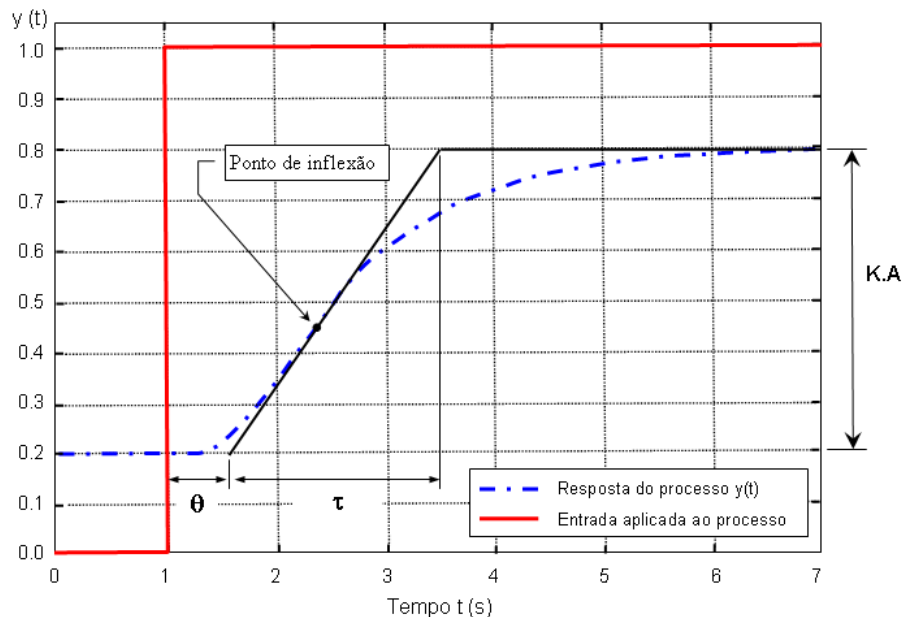


Figura 2.7 – Aplicação do método da tangente para determinação dos parâmetros  $\theta$  e  $\tau$  do modelo representado por um sistema de 1ª ordem mais atraso de transporte

O atraso de transporte  $\theta$  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 2.7.

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  $\tau$  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 o tempo em que a resposta do processo atinge 63,2% de seu valor final corresponde a  $\theta + \tau$ . A determinação do valor de  $\theta$  é feita de forma idêntica à do método da tangente. Sua aplicação pode ser vista na Figura 2.8.

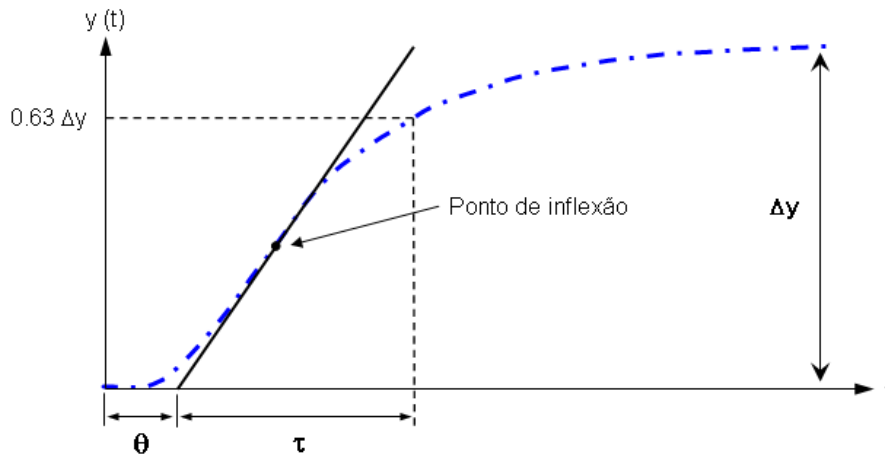


Figura 2.8 – Obtenção dos parâmetros  $\theta$  e  $\tau$  pelo método dos 63,2% a partir de uma curva de reação do processo

A linha tangente é difícil de ser traçada com precisão prática. Uma alternativa, o Método de Smith é determinar  $\theta$  e  $\tau$  a partir de dois pontos na curva de reação do processo. A solução analítica para a resposta ao degrau de amplitude  $A$  de um sistema de 1ª ordem mais atraso de transporte é apresentada na equação (2.7).

$$y(t) = A \left[ 1 - e^{-\frac{(t-\theta)}{\tau}} \right] \quad (t > 0) \quad (2.7)$$

Suponha que se calcule  $y(t)$  em dois instantes de tempo quaisquer, por exemplo,  $t = \theta + \tau/3$  e  $t = \theta + \tau$ , como apresentado nas equações (2.8) e (2.9).

$$y\left(\theta + \frac{\tau}{3}\right) = 0,284 \cdot \Delta y \quad (2.8)$$

$$y(\theta + \tau) = 0,632 \cdot \Delta y \quad (2.9)$$

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

(2.10) e (2.11).

$$t_{0,284} = \theta + \frac{\tau}{3} \quad (2.10)$$

$$t_{0,632} = \theta + \tau \quad (2.11)$$

A solução desse sistema de duas equações fornece  $\theta$  e  $\tau$ , conforme as equações (2.12) e (2.13).

$$\tau = 1,5 \cdot (t_{0,632} - t_{0,284}) \quad (2.12)$$

$$\theta = 1,5 \cdot \left( t_{0,284} - \frac{t_{0,632}}{3} \right) = t_{0,632} - \tau \quad (2.13)$$

Um método similar ao anterior é o Método de Sundaresan e Krishnaswamy. Neste, adotam-se dois instantes arbitrários,  $t_1$  e  $t_2$  e calcula-se  $\theta$  e  $\tau$  pelas equações (2.14) e (2.15).

$$\tau = 0,675 \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.14)$$

$$\theta = 1,29 \cdot t_1 - 0,294 \cdot t_2 \quad (2.15)$$

Os instantes  $t_1$  e  $t_2$  são adotados a partir da curva de resposta a um sinal de

entrada do tipo degrau e correspondem a 35,3% e 85,3%, respectivamente, dos valores da variação da resposta em regime estacionário.

## 2.7.2 Modelagem Neuro-Fuzzy

### 2.7.2.1 Conceitos e fundamentos sobre conjuntos e Lógica Fuzzy

Antes de se iniciar uma discussão mais aprofundada sobre Lógica *fuzzy*, é adequado e conveniente apresentar uma breve revisão sobre os fundamentos de conjuntos *fuzzy*.

Seja  $U$  um conjunto universo de discurso,  $A$  um subconjunto de  $U$ , e  $x$  um elemento particular de  $U$ .

Define-se a função característica como sendo uma função  $\mu_A: U \rightarrow \{0,1\}$ , com

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.16)$$

Pode-se observar que a função característica assim definida é um mapeamento do conjunto universo  $U$ , para os elementos do conjunto  $\{0,1\}$ , assumindo deste modo apenas valores discretos e dividindo o conjunto universo em duas partes com fronteiras bem definidas.

A função característica, deste modo, **pertence ou não** ao conjunto.

A teoria dos conjuntos *fuzzy*, introduzida por Zadeh (1965), surgiu como um meio de representação e manipulação de dados imprecisos, e são conjuntos que não possuem fronteiras bem definidas como na teoria usual de conjuntos. Estes foram propostos pelo fato dos conjuntos clássicos apresentarem limitações para lidar com problemas onde transições (passagem de pertinência para a não pertinência) de uma classe para outra acontecem de forma lenta e gradual (BENINI e JUNIOR, 2008).

As funções de pertinência *fuzzy* são aquelas que representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *fuzzy*. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso (SIMÕES e SHAW, 2007).

Zadeh (1965) define função de pertinência considerando que  $U$  seja um conjunto universo não vazio ( $U \neq \emptyset$ ). Lembrando que um conjunto *fuzzy*  $A$  em  $U$  pode ser caracterizado por sua função de pertinência:

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1] \quad (2.17)$$

$$x \rightarrow \mu_A(x)$$

sendo  $\mu_A(x)$  interpretado como o grau de pertinência do elemento  $x$  no conjunto *fuzzy*  $A$  para cada  $x \in U$ .

Um conjunto *fuzzy*  $A$  em um conjunto universo  $U$  é um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico  $x$  e seu respectivo grau de pertinência  $\mu_A(x)$  (LEE, 1990; BENINI e JUNIOR, 2008).

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \quad (2.18)$$

Zadeh (1973) propôs uma caracterização, generalizando a função característica de maneira que esta pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo  $[0,1]$ , sugerindo que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. Neste caso, o grau de pertinência pode assumir qualquer valor no intervalo fechado  $[0, 1]$ , sendo o valor 0 usado para representar não-pertinência completa, o valor 1 usado para representar pertinência completa, e os valores entre 0 e 1 usados para representar os graus intermediários de pertinência do subconjunto  $A$ . Esta generalização, faz com que a função característica passe a ser contínua no seu domínio, aumentando o poder de expressão da função característica (BENINI e JUNIOR, 2008).

Na teoria dos conjuntos fuzzy, a ideia da função da inclusão é flexibilizada, a qual indica que um determinado elemento pertence mais ao conjunto do que outros



elementos pertencentes ao mesmo conjunto, ou seja, **os elementos podem pertencer parcialmente ao conjunto** (BENINI e JUNIOR, 2008).

A função que define o grau de pertinência de um determinado elemento em um conjunto *fuzzy*, levando em consideração o seu universo de discurso, é definida como função de pertinência (BENINI e JUNIOR, 2008).

Quanto ao formato das funções de pertinências, estes são escolhidos com base na experiência e na natureza do processo a ser modelado.

Segundo Simões e Shaw (2007) os formatos mais frequentes são o triangular (Figura 2.9) e o trapezoidal (Figura 2.10), pois são gerados com facilidade.

Outro formato existente, é o *Fuzzy-tom* ou *singleton* (Figura 2.11); porém os autores citam que, em casos onde um desempenho suave é de importância crítica, podem ser usadas funções como, por exemplo, do tipo gaussiana (Figura 2.12).

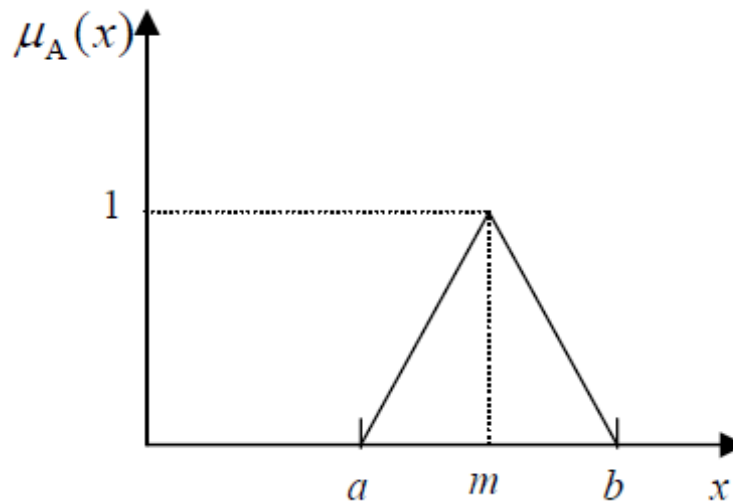


Figura 2.9 – Função de pertinência triangular Fonte: Benini e Júnior (2008)

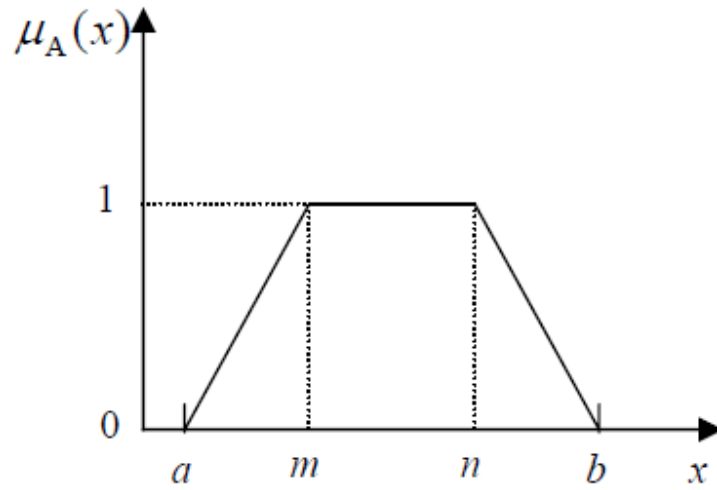


Figura 2.10 – Função de pertinência trapezoidal Fonte: Benini e Júnior (2008)

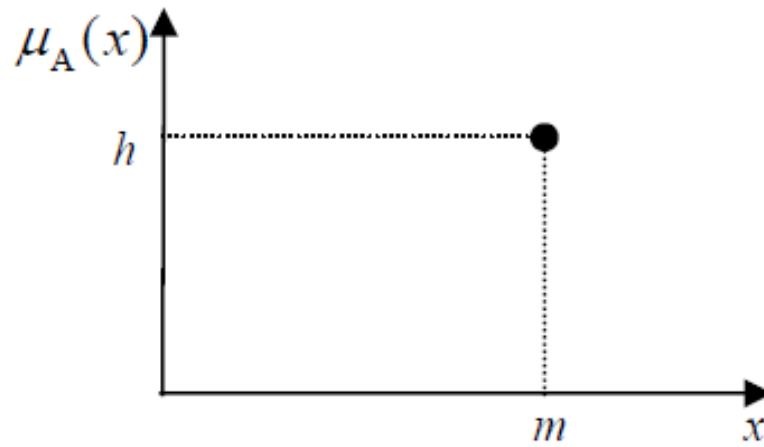


Figura 2.11 – Função de pertinência Fuzzy-ton ou singleton Fonte: Benini e Júnior (2008)

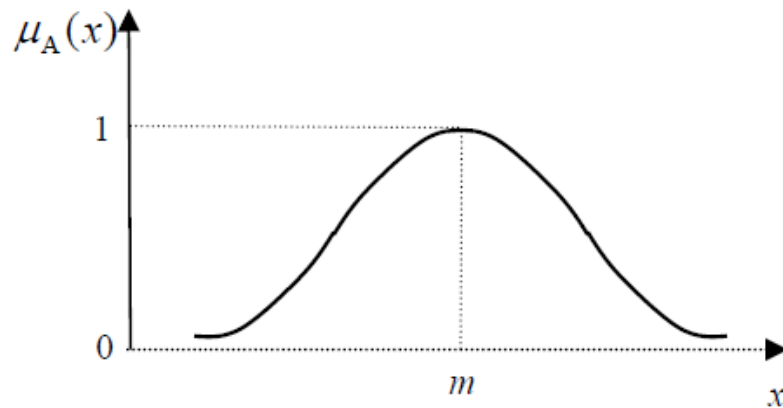


Figura 2.12 – Função de pertinência gaussiana Fonte: Benini e Júnior (2008)

A partir das definições citadas, um termo importante para o uso das funções de pertinência é o de variáveis linguísticas. Lee (1990) define que uma variável linguística é caracterizada pela quintupla  $(x, T(x), U, G, M)$ , onde  $x$  é o nome da variável;  $T(x)$  é o termo do conjunto de  $x$ , que é o conjunto de nomes dos valores linguísticos de  $x$  com cada valor sendo um número *fuzzy* definido em  $U$ ;  $G$  é a regra sintática para gerar os nomes dos valores de  $x$ ; e  $M$  é uma regra semântica para associar o significado para cada valor.

Por exemplo, se a velocidade é interpretada como uma variável linguística, então seu conjunto de termos  $T(\text{velocidade})$  poderiam ser:

$$T(\text{velocidade}) = \{\text{lenta, moderada, rápida, muito lenta, mais ou menos rápida, \dots}\}$$

onde cada termo em  $T(\text{velocidade})$  é caracterizado por um conjunto *fuzzy* em um universo de discurso  $U = [0,100]$ . Poderíamos interpretar “lenta” como “uma velocidade abaixo de 40 km/h”, “moderada” como “uma velocidade próxima de 55 km/h” e “rápida” como “uma velocidade acima de 70 km/h”. Estes termos podem ser caracterizados como conjuntos *fuzzy*; um exemplo representativo de funções de pertinência é mostrado na figura 2.13.

Para os sistemas que utilizam a lógica *fuzzy*, o processamento de informações *fuzzy* é normalmente consistido de operações que são realizadas sobre os seus conjuntos *fuzzy*.

Para abstração destas informações, sejam  $A$  e  $B$  dois conjuntos *fuzzy* definidos em um universo de discurso  $U$  com funções de pertinências  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ , respectivamente. As operações *fuzzy* básicas de **união**, **intersecção** e **complemento** são definidas por Zadeh (1965):

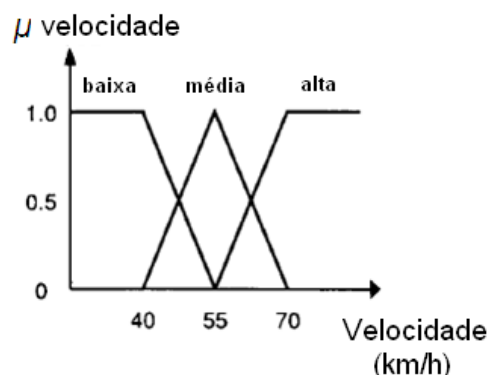


Figura 2.13 – Exemplo representativo de funções de pertinência Fonte: Benini e Júnior (2008)

i) Conjunto União

A união entre dois conjuntos *fuzzy*  $A$  e  $B$ , pertencentes a um mesmo universo de discurso  $U$ , é formado por todos os valores máximos entre  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ , para todo  $x \in U$ . A figura 2.14 (a) apresenta um diagrama dos conjuntos  $A$  e  $B$  e a figura 2.14 (b) o diagrama da união dos mesmos. Formalmente, tem-se:

$$\mu_{A \cup B} = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = (\mu_A \cup \mu_B)(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.19)$$

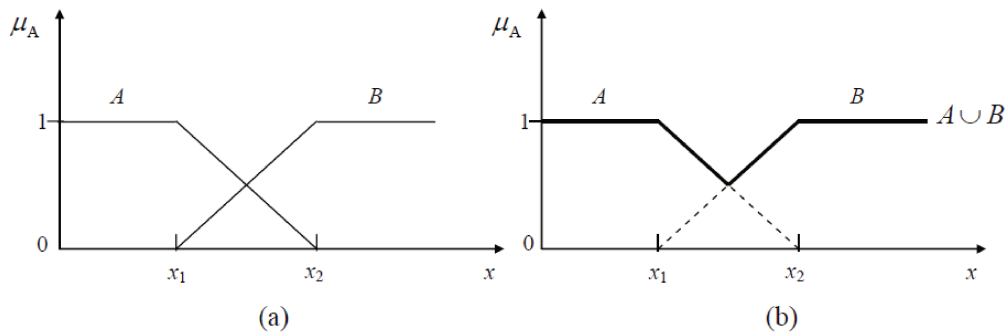


Figura 2.14. (a) Diagrama dos conjuntos  $A$  e  $B$  (b) Diagrama da união  $A \cup B$  Fonte: Benini e Júnior (2008)

ii) Conjunto Intersecção

A intersecção entre dois conjuntos *fuzzy*  $A$  e  $B$ , pertencentes a um mesmo universo de discurso  $U$ , é formado por todos os valores mínimos entre  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ , para todo  $x \in U$ , ou seja,

$$\mu_{A \cap B} = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = (\mu_A \cap \mu_B)(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.20)$$

A figura 2.15 (a) apresenta um diagrama dos conjuntos  $A$  e  $B$  e a figura 2.15 (b) o diagrama da intersecção dos mesmos.

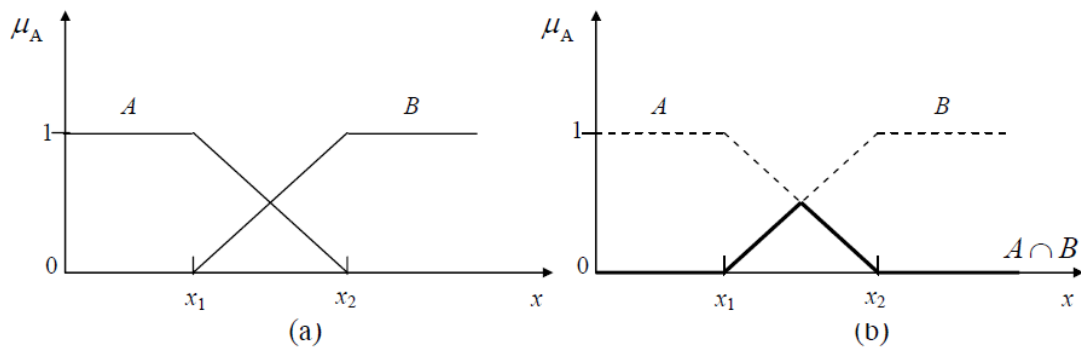


Figura 2.15. (a) Diagrama dos conjuntos A e B (b) Diagrama da intersecção  $A \cap B$  Fonte: Benini e Júnior (2008)

### iii) Conjunto Complemento

O complemento de um conjunto *fuzzy*  $A$ , pertencente a um universo de discurso  $U$ , é formado pela subtração de  $\mu_A(x)$  do valor unitário 1, ou seja,

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x); x \in U \quad (2.21)$$

A figura 2.16 apresenta um diagrama do complemento do conjunto  $A$ .

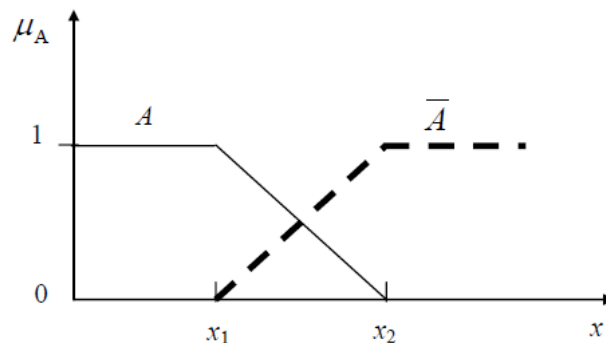


Figura 2.16. Diagrama do complemento ( $\bar{A}$ ) do conjunto A Fonte: Benini e Júnior (2008)

#### 2.7.2.2 Inferência de regras Fuzzy

O processo de inferência *fuzzy* ou raciocínio aproximado permite que sistemas *fuzzy* sejam elaborados por um conjunto de regras *fuzzy* através de proposições

condicionais, do tipo “**se** (condição)... **então** (ação)”, baseadas nas variáveis linguísticas para executar um processo de tomada de decisão.

As regras *fuzzy* descrevem situações específicas que podem ser submetidas à análise de especialistas, e cuja inferência conduz a algum resultado desejado (ORTEGA, 2001 apud BENINI e JUNIOR, 2008). A inferência baseada em regras *fuzzy* pode ser compreendida como um funcional que mapeia um conjunto de uma ou mais variáveis de entrada associadas a um conjunto *fuzzy*, denominadas premissas ou antecedentes, para um conjunto de uma ou mais variáveis de saída, também associadas a conjuntos *fuzzy*, denominadas consequentes ou conclusão, de um dado sistema. Segundo Lee (1990), cada regra *fuzzy* é composta por uma parte antecedente ou premissa, parte “**se**”, e uma parte consequente ou conclusão, parte “**então**”, resultando em uma estrutura do tipo:

**Se** < proposição *fuzzy* antecedente > **Então** < proposição *fuzzy* consequente >.

Uma proposição *fuzzy* simples, representada por “ $x$  é  $A$ ”, onde  $x$  é um valor do domínio e  $A$  uma variável linguística, estabelece uma relação entre um valor  $x$  do domínio e o espaço *fuzzy* (COX, 1992). Dessa maneira, modelos *fuzzy* representam um sistema através de um conjunto do tipo:

Se “ $x$  é  $A$ ” Então “ $y$  é  $B$ ”

sendo a proposição “ $x$  é  $A$ ” o antecedente e a proposição “ $y$  é  $B$ ” o consequente da regra *fuzzy*.

As proposições podem também ser estabelecidas através de composição de proposições simples, denominadas proposições *fuzzy* compostas, utilizando conectivos lógicos “**e**”, “**ou**” e “**não**” representando, respectivamente, a **intersecção**, **união** e **complemento** *fuzzy*. Assim, se  $x$  e  $y$  são variáveis linguísticas nos universos de discurso  $U$  e  $V$ , e  $A$  e  $B$  são conjuntos *fuzzy*, respectivamente, em  $U$  e  $V$ , tem-se:

i) a proposição *fuzzy* composta dada por:

“ $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$ ”

é uma relação *fuzzy*  $A \cap B$  em  $U \times V$  definida por seu grau de pertinência:

$$\mu A \cap B(x, y) = t(\mu A(x), \mu B(y)) = \min(\mu A(x), \mu B(y)) \quad (2.22)$$

com  $t: [0, 1] \times [1, 0] \rightarrow [0, 1]$  definida como uma T-norma;

ii) a proposição *fuzzy* composta dada por:

“ $x$  é **A** **ou**  $y$  é **B**”

é uma relação *fuzzy*  $A \cup B$  em  $U \times V$  definida por seu grau de pertinência

$$\mu A \cup B(x, y) = s(\mu A(x), \mu B(y)) = \max(\mu A(x), \mu B(y)) \quad (2.23)$$

com  $s: [0, 1] \times [1, 0] \rightarrow [0, 1]$  uma S-norma;

iii) a proposição *fuzzy* composta dada por:

“ $x$  é **não A**”

é uma relação *fuzzy*  $\bar{A}$  em  $U$  definida por seu grau de pertinência

$$\mu \bar{A}(x) = 1 - \mu A(x) \quad (2.24)$$

As variáveis de entrada são conectadas entre si por intermédio dos operadores lógicos *fuzzy*, e estas se associam a valores linguísticos (conjuntos *fuzzy*), em todo universo de discurso por meio de funções de pertinência.

Na utilização de regras composicionais de inferência é possível definir procedimentos para se obter uma conclusão *fuzzy* a partir de uma ou mais regras, representadas por uma relação *fuzzy*  $R$ , e de um fato *fuzzy* (DELGADO, 2002). Assim, se  $x$  e  $y$  são variáveis linguísticas compostas respectivamente por um conjunto de termos  $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  e  $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$  então o problema básico do processo de inferência é encontrar uma função de pertinência que represente a consequência da aplicação simultânea de regras da forma “se ... então”.

Formalmente, dado um fato observável ( $x$  é  $A'$ ), o qual é representado por um conjunto *fuzzy*  $A'$ , e uma base de regras dada por uma relação *fuzzy*  $R$ , um conjunto *fuzzy* induzido pelo fato  $x$  é  $A'$  e pela regra  $R$ , é dado por:

Fato:  $x$  é  $A'$

Regra 1: **se**  $x$  é  $A_1$  **então**  $y$  é  $B_1$

Regra 2: **se**  $x$  é  $A_2$  **então**  $y$  é  $B_2$

⋮

Regra  $n$ : **se**  $x$  é  $A_n$  **então**  $y$  é  $B_n$

Consequência:  $y$  é  $B'$

O processo de inferência *fuzzy* aplicado nas regras acima, em geral, é baseado na regra *modus ponens* generalizada explicitada por:

Fato:  $x$  é  $A'$

Regra: **se**  $x$  é  $A$  **então**  $y$  é  $B$

Consequência:  $y$  é  $B'$

onde  $A$ ,  $A'$ ,  $B$  e  $B'$  são conjuntos *fuzzy* associados aos valores das variáveis linguísticas  $x$  e  $y$ .

Delgado (2002) afirma que todo método de raciocínio pode ser definido como um processo de inferência que produz conclusões a partir de um conjunto formado por uma ou mais regras e fatos conhecidos. O raciocínio aproximado envolve a computação com regras imprecisas e mecanismos de inferência específicos (como no raciocínio humano). Como exemplo, considere o fato de que o “o tomate é mais ou menos vermelho” e a regra “se o tomate é vermelho então ele está maduro”. Pode-se então concluir que “o tomate está mais ou menos maduro”.

### 2.7.2.3 Sistema de inferência Fuzzy

Segundo Benini e Junior (2008) os sistemas de inferência *fuzzy* são sistemas que mapeiam as entradas advindas de um conjunto de dados resultantes de medições ou observações experimentais em saídas precisas,  $y = f(x)$ , onde  $x$  é entrada e  $y$  a saída do sistema de inferência *fuzzy* e  $f$  uma representação quantitativa do mapeamento.

A estrutura de um sistema de inferência é baseada em um conjunto de regras



*fuzzy* incluindo quatro componentes básicos principais (JANG et al.,1997 apud DELGADO,2002):

- i) um *fuzzyficador*, que traduz a informação de entrada em conjuntos *fuzzy*. A cada variável de entrada são atribuídos termos linguísticos que são os estados da variável, e cada termo linguístico é associado a um conjunto *fuzzy* traduzido por uma função de pertinência;
- ii) uma base de conhecimento, que consiste de um conjunto de regras *fuzzy* e de uma base de dados. No conjunto de regras *fuzzy* (conhecido como base de regras) estão as declarações linguísticas do tipo “se...então”, definidas por especialistas ou retiradas de um conjunto de dados numéricos. Na base de dados estão as variáveis linguísticas, as definições dos respectivos universos de discurso e o conjunto de funções de pertinências;
- iii) um método de inferência, que aplica um raciocínio *fuzzy* para obter uma saída *fuzzy*;
- iv) um *defuzzyficador*, que traduz a saída em um valor numérico.

Em uma base de regras, quando mais de uma regra é acionada, as contribuições das diversas regras após a inferência são combinadas pelo operador de agregação. Para uma única regra  $R: A \rightarrow B$ , o processo de inferência de  $B'$  a partir do fato  $A'$ , e da regra *fuzzy*  $R$ , é dado por:

$$B' = A' \circ R = A' \circ (A \rightarrow B) \quad (2.25)$$

Quando são apresentadas mais de duas regras, o raciocínio *fuzzy* é realizado sobre um conjunto de  $m$  regras *fuzzy* na forma:

Regra  $i = R_i$ : **Se**  $x$  é  $A_i$  **então**  $y$  é  $B_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$

Cada regra individual  $R_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) é induzida por uma relação *fuzzy* diferente. Assim, o conjunto de regras, por sua vez, resulta numa relação *fuzzy* obtida pela agregação de todas as relações individuais, através da operação união:

$$B' = \bigcup_{i=1}^m (B' i) = \bigcup_{i=1}^m (A' \circ R) \quad (2.26)$$

A função para o operador agregação é o operador união, ou seja, a agregação do conjunto de regras é realizada através do operador união sobre todas as relações individuais (ORTEGA, 2002 apud BENINI e JUNIOR, 2008). Por exemplo, supondo  $B'_i$ , ...,  $B'_n$  todos os resultados derivados das diversas regras acionadas, todos relacionados a uma mesma variável linguística, o resultado da implicação de todas as regras  $B'$  é dada por:

$$B' = \bigcup_{i=1}^m (B' i) \quad (2.27)$$

onde o símbolo  $U$  representa o operador agregação.

Delgado (2002) afirma que para a agregação do conjunto de regras, vários métodos podem ser utilizados; na maioria dos casos o antecedente (parte “**se**”) é formado por proposições linguísticas e a distinção entre os modelos se dá no consequente (parte “**então**”) das regras *fuzzy*. Entre os modelos mais conhecidos, dois deles podem ser destacados:

- i) modelo de **Mamdani** (MAMDANI e ASSILIAN, 1975, apud DELGADO, 2002): utiliza conjuntos *fuzzy* tanto no antecedente como no consequente das regras *fuzzy*. A saída final é representada por um conjunto *fuzzy* resultante da agregação da saída inferida de cada regra. Para se obter uma saída final não *fuzzy* adota-se um dos métodos de transformação da saída *fuzzy* em não-*fuzzy* (ou seja, traduz-se a saída por um valor numérico);
- ii) modelo de **Takagi-Sugeno** (TAKAGI e SUGENO, 1983, apud DELGADO, 2002): no qual o antecedente é uma proposição *fuzzy* e o consequente é representado por uma função das variáveis de entrada. A saída final é obtida pela média ponderada das saídas inferidas de cada regra.

Utilizando-se a regra composicional de inferência, é possível definir um procedimento para se obter uma conclusão *fuzzy*  $B'$  a partir de uma ou mais regras (representadas pela relação *fuzzy*  $R$ ) e de um fato  $A$ . Para isso é necessária a definição da relação  $R$  que representa a base de regras *fuzzy* (DELGADO, 2002).

Neste trabalho, será detalhado somente o modelo de Takagi-Sugeno.

#### 2.7.2.4 Modelo de Takagi-Sugeno

O sistema de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno, representa um sistema dinâmico ou um controle que associa um conjunto de regras linguísticas no antecedente (parte “**se**”) com proposições *fuzzy*, e no conseqüente (parte “**então**”) são apresentadas expressões funcionais do tipo  $y = f(x)$ , das variáveis linguísticas do antecedente.

A base de regras *fuzzy* para o modelo de Takagi-Sugeno, é da forma:

Regra  $i$ : Se  $x_1$  é  $A_{1,i}$  e  $x_2$  é  $A_{2,i}$  e ... e  $x_n$  é  $A_{n,i}$  então  $y_i = f_i(x)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$

onde  $m$  é o número de regras,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são as variáveis de entrada,  $A_{1,i}, A_{2,i}, \dots, A_{n,i}$  são conjuntos *fuzzy* no antecedente das regras de um sistema MISO, nos universos de discursos  $U_1, U_2, \dots, U_n$ , respectivamente,  $p_i$  e  $q_i$  são os coeficientes dos polinômios e  $f_i(x)$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ , são funções lineares ou não-lineares das variáveis numéricas de entrada.

A Figura 2.17 ilustra o processo de inferência de Takagi-Sugeno quando existem duas regras definidas por:

Regra 1: Se  $x_1$  é  $A_{1,1}$  e  $x_2$  é  $A_{2,1}$  então  $y_1 = f_1(x_1, x_2)$

Regra 2: Se  $x_1$  é  $A_{1,2}$  e  $x_2$  é  $A_{2,2}$  então  $y_2 = f_2(x_1, x_2)$

onde  $y_i = f_i(x_1, x_2) = p_i x_1 + q_i x_2 + r_i$ ,  $i = 1, 2$ .

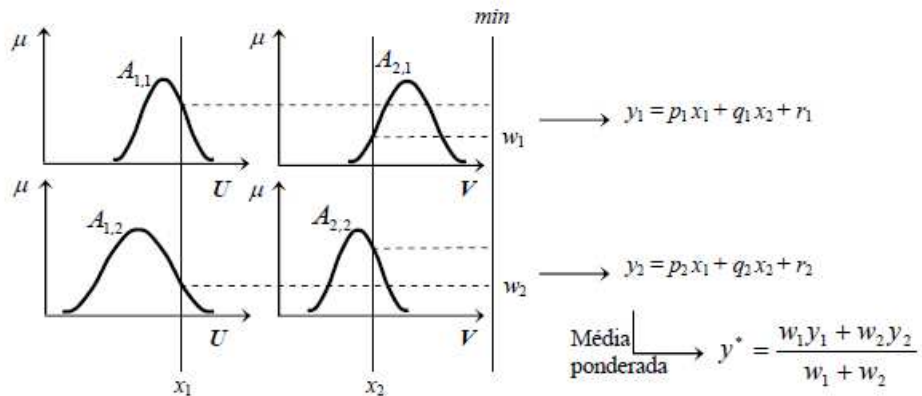


Figura 2.17. Processo de inferência Takagi-Sugeno com duas regras definidas Fonte: Benini e Júnior (2008)

Os sistemas de inferência *fuzzy* permitem que sistemas *fuzzy* sejam elaborados por um conjunto de regras *fuzzy* através de proposições condicionais, do tipo “se ... então”, baseadas nas variáveis linguísticas para executar um processo de tomada de decisão (BENINI e JUNIOR, 2008).

O modelo Takagi-Sugeno foi proposto como resultado de um esforço para se desenvolver, de forma sistemática, uma abordagem para a geração de regras *fuzzy* a partir de dados de entrada-saída (DELGADO, 2002).

Benini e Junior (2008) afirmam ainda que o sistema *fuzzy* paramétrico se baseia no espaço das variáveis de entrada onde é realizada uma partição *fuzzy*, e em cada subespaço *fuzzy*, que corresponde a uma regra, se estabelece uma relação linear entre a variável de entrada e a variável de saída.

Os citados sistemas de inferência *fuzzy* tem sido utilizados para modelar processos complexos, não lineares e vagos, com base em um conjunto regras do tipo “se ... então”, que representam as entradas e saídas do modelo, que combinadas com métodos de redes neurais artificiais, dão origem ao método classificado como híbrido.

Para uma melhor compreensão do que são os sistemas chamados híbridos, é apresentada uma ideia do que vem a ser redes neurais artificiais.

### 2.7.2.5 Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNA's) são modelos matemáticos que se assemelham às estruturas neurais biológicas com capacidade computacional adquirida por meio de aprendizado. Benzecry et al. (2008) descrevem o conceito básico de um neurônio típico (Figura 2.18).

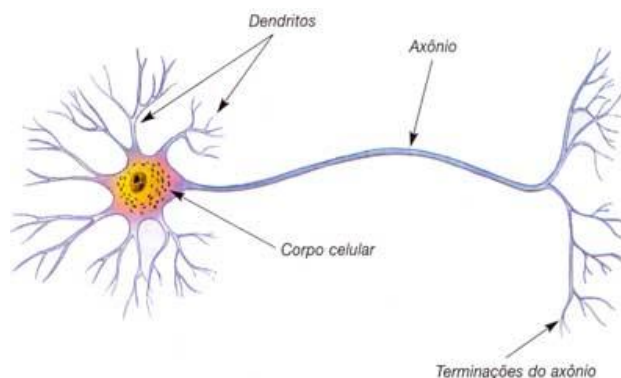


Figura 2.18. Neurônio típico Fonte: Benzecry et al. (2008)

A partir do corpo celular, ou soma – o centro dos processos metabólicos da célula nervosa – são projetadas extensões filamentosas, conhecidas como dendritos e axônio. A partir de estudos realizados nas décadas de 50 e 60, passou-se a entender o neurônio biológico como sendo basicamente o dispositivo computacional elementar do sistema nervoso, que possuía múltiplas entradas e apenas uma saída. As entradas ocorrem através das conexões sinápticas, que conectam a árvore dendrital aos axônios de outras células nervosas. Os sinais que chegam por esses axônios são pulsos elétricos conhecidos como impulsos nervosos ou potenciais de ação, e constituem a informação que o neurônio processará, de alguma forma, para produzir como saída um impulso nervoso no seu axônio.

A construção de RNA's tem inspiração nos neurônios biológicos e nos sistemas nervosos; informalmente é um sistema composto por vários neurônios, os quais estão ligados por conexões, chamadas conexões sinápticas (BARRETO, 2002).

Uma RNA é composta por um número de elementos simples interconectados, cada elemento realizando uma operação de agregação a partir de um modelo de um

neurônio físico (GOMIDE e GUDWIN, 1994).

De forma a definir as RNA's poderia ser estabelecido um teorema mostrando que elas se constituem em sistemas dinâmicos, da mesma forma que foi feito para os neurônios. Todavia, um problema surgiria aqui: nada seria dito acerca dos pesos das conexões entre os diferentes neurônios da rede. Outra abordagem descrita por Barreto (2002) seria a de considerar uma rede neural como um sistema dinâmico complexo, onde este sistema dinâmico complexo é uma rede de sistemas interconectados e pode ser representado por um grafo direcionado ou dígrafo, onde os vértices representam os sistemas componentes (subsistemas) e os arcos as interações entre subsistemas.

Para uma melhor compreensão, um Grafo  $G$  consiste de um conjunto não vazio finito de vértices  $V$ , juntamente com um conjunto não ordenado de arcos  $A$  conectando certos pares de vértices. Cada par  $(v_i, v_j)$  de vértices em  $V$  é um arco de  $G$ , e o par  $(v_i, v_j)$  é dito "juntar"  $v_i$  e  $v_j$ . A figura 2.19 traz um exemplo de um grafo direcionado simples, onde um arco ( $A_1$ ) conecta o par de vértices  $(v_1, v_2)$  em  $V$ .

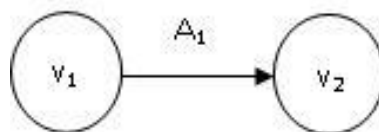


Figura 2.19. Exemplo de um grafo direcionado

Um Grafo  $G$  é Rotulado quando os  $p$  vértices são distinguíveis uns dos outros por nomes ou rótulos e os arcos também são distinguíveis uns dos outros por nomes ou rótulos.

Uma Rede Neural Artificial, RNA, baseando-se nos conceitos definidos, é um Sistema Dinâmico Complexo representado por um grafo arco rotulado em que cada vértice é um Neurônio Artificial.

Nesta definição, rótulos são, naturalmente, valores numéricos. Eles correspondem aos valores das conexões entre os diferentes neurônios. Todavia, eles podem ser interpretados, também, como os valores *fuzzy* entre as conexões. Neste caso, eles devem pertencer a um conjunto  $[0, 1]$ . Daí pode-se definir um Grafo *Fuzzy* como um Grafo Arco Rotulado onde os rótulos são valores de um conjunto *Fuzzy*.

Logo uma **Rede Neural Fuzzy**, ou **Neuro Fuzzy** é:

- i) uma rede neural representada por um grafo *Fuzzy*;
- ii) ou uma rede neural contendo ao menos um neurônio *Fuzzy*.

Barreto (2002) ressalta ainda que, frequentemente, é comum representar as RNA's em camadas e, neste caso, são chamadas redes em camadas. Neurônios que recebem sinais de excitação são chamados da camada de entrada, ou primeira camada. Neurônios que têm sua saída como saída da rede pertencem a camada de saída ou última camada. Neurônios que não pertencem nem a camada de entrada nem a de saída são neurônios internos à rede podendo se organizar em uma ou mais camadas internas.

A figura 2.20 mostra uma rede direta com 3 camadas de neurônios (entrada, saída e camadas intermediárias). Observe que nesta figura os neurônios são apresentados com os seus diversos elementos constituintes.

Estas redes são atualmente as mais populares, principalmente por existirem métodos de aprendizado bastante difundidos e fáceis de usar. Um método bastante utilizado – descrito na Seção 2.7.2.6 – é o algoritmo de retropropagação (*backpropagation*) (BARRETO, 2002).

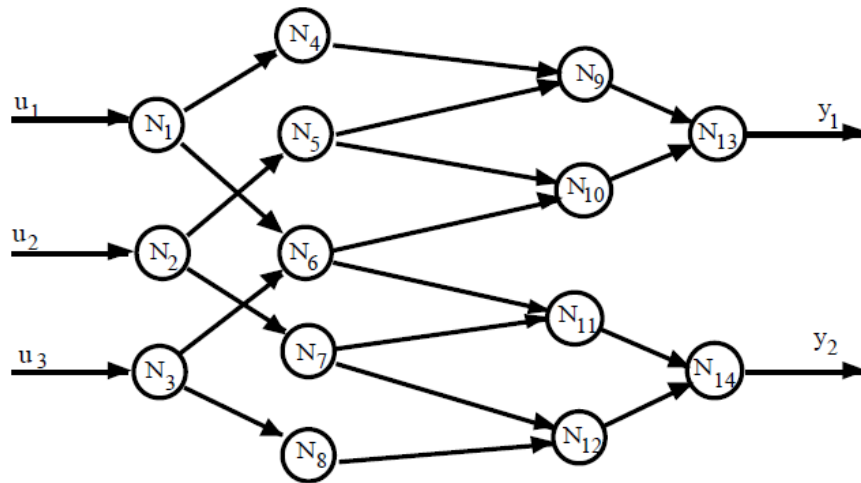


Figura 2.20 – Rede neural artificial em camadas Fonte: Barreto, 2002

Pode-se tirar de conclusão do citado que a rede neural é capaz de realizar

interpolações de forma similar ao caso da inferência *fuzzy*. Contudo é em geral muito difícil de entender, apenas pela observação do conjunto de parâmetros, como a rede neural se comporta. Se o sistema está sujeito a variações em seu comportamento, nova aprendizagem deve, em geral, ser executada para se obter um novo conjunto de pesos e limiares correspondentes, e muitas vezes os resultados não são razoáveis. Isto é, existe uma maior dificuldade em projetar sistemas para fins de modelagem com redes neurais do que com sistemas *fuzzy* (GOMIDE e GUDWIN, 1994).

Por essa razão o potencial de manuseio de incertezas e de controle de sistemas complexos proporcionado pela lógica *fuzzy* é combinado com redes neurais artificiais as quais, possuem características de aprendizagem e adaptação.

#### 2.7.2.6 Sistema de Inferência Fuzzy Neuro Adaptativo (ANFIS)

Uma rede neural adaptativa se caracteriza por um grafo formado por nós e conexões, onde os nós representam entradas e saídas, e cada um destes nós representa uma unidade de processamento, tendo associado a ele uma função. Cada arco do grafo indica uma relação entre os nós conectados. O conjunto de nós pode ser dividido em dois subconjuntos:

- i) os nós adaptativos, cujas saídas dependem não só de suas entradas, mas também de parâmetros modificáveis, internos ao modelo;
- ii) e, em caso contrário, os nós, cuja função depende somente das entradas, denominados não adaptativos.

Dentre as abordagens que usam métodos híbridos destaca-se o sistema de inferência *fuzzy* neuro adaptativo (ANFIS), do inglês *Adaptive Network-based Fuzzy Inference System*, proposto por Jang (1993). O modelo ANFIS funciona de modo equivalente aos sistemas de inferência *fuzzy*, e suas capacidades adaptativas as fazem aplicáveis a uma grande quantidade de áreas de estudos como, por exemplo, em classificação de dados e, no caso deste estudo, extração de características a partir de modelos. Uma propriedade do modelo ANFIS é que o conjunto de parâmetros pode ser decomposto para utilizar uma regra de aprendizagem híbrida mais eficiente que os



mecanismos tradicionais encontrados na literatura.

O modelo ANFIS é uma ferramenta disponível no entorno técnico do aplicativo MATLAB que suporta apenas sistema de Takagi-Sugeno de ordem zero ou um, e permite várias variáveis de entrada, porém, com somente uma variável saída que o faz ser identificado como um modelo MISO (BENINI e JUNIOR, 2008).

Diferentes sistemas de inferência *fuzzy* proporcionam diferentes arquiteturas para o modelo ANFIS. O sistema de inferência *fuzzy* construído do tipo Takagi-Sugeno é definido por um conjunto de regras da forma já apresentada na seção 2.7.2.4:

Se  $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$ , então  $z = f(x,y)$

onde  $x$  e  $y$  são variáveis *fuzzy*,  $A$  e  $B$  são conjuntos *fuzzy* e  $f$  é uma função de  $x$  e  $y$  que aproxima o valor de  $z$ . Usualmente a função  $f$  é uma combinação linear das variáveis de entrada, cujos coeficientes são estimados usando mínimos quadrados (BENINI e JUNIOR, 2008).

A aprendizagem do sistema ANFIS tem dois conjuntos de parâmetros que devem ser treinados: os parâmetros do antecedente, que são as constantes que caracterizam as funções de pertinência, e os parâmetros do consequente, que são os parâmetros lineares da saída do modelo de inferência. A aprendizagem do modelo ANFIS emprega o algoritmo de retropropagação para otimizar os parâmetros do antecedente e o algoritmo de mínimos quadrados para determinar os parâmetros lineares do consequente, ou seja, o aprendizado é realizado em duas etapas, dadas a seguir, que se repetem até que o critério de parada seja alcançado (BENINI e JUNIOR, 2008):

Etapa 1 – os parâmetros do antecedente (entradas) permanecem fixos, e se utiliza do algoritmo de estimação de mínimos quadrados sobre os parâmetros do consequente (saídas) para cada regra. Uma vez identificados os parâmetros do consequente, o erro é calculado como a diferença entre a saída da rede e a saída desejada apresentada nos pares de treinamento. Uma das medidas mais usuais para o erro de treinamento é a soma de erros quadráticos, definido por:

$$SEQ = \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (2.28)$$

onde  $N$  é o número de pares observados,  $y_k$  corresponde aos dados de treinamento proporcionados (saídas desejadas) e  $\hat{y}_k$  é a correspondente saída da rede;

A figura 2.21 ilustra esta etapa de maneira simplificada.

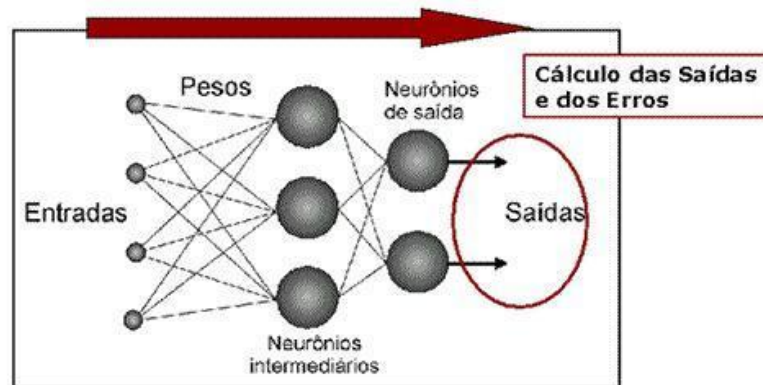


Figura 2.21 – Etapa de cálculo das saídas e dos erros Fonte: <<http://www.labinfo.Incc.br/>>

Etapa 2 – os parâmetros dos consequentes permanecem fixos, e se utiliza o algoritmo de retropropagação (backpropagation) sobre os parâmetros do precedente para cada regra;

Silva (2003) descreve resumidamente as etapas do Algoritmo de aprendizagem *backpropagation* padrão:

- i) Inicialização: pesos iniciados com valores aleatórios e pequenos (peso  $\leq 0.1$ );
- ii) Treinamento: *Loop* até que o erro de cada neurônio de saída seja menor ou igual à tolerância, para todos os padrões do conjunto de treinamento; no treinamento deve-se apresentar um conjunto formado pelo par: entrada para a rede e valor desejado para resposta à entrada. A saída será comparada ao valor desejado e será computado o erro global da rede, que influenciará na correção dos pesos.

A figura 2.22 ilustra esta etapa de maneira simplificada.

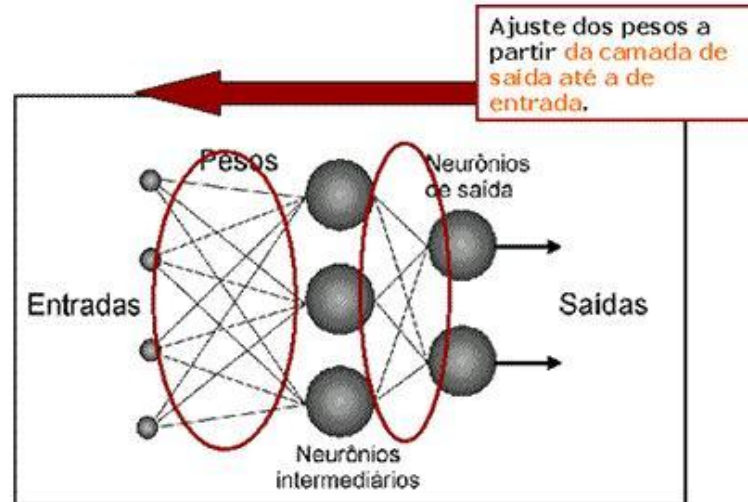


Figura 2.22 – Etapa de ajuste dos pesos Fonte: <<http://www.labinfo.lncc.br/>>

Estas etapas são executadas até que o número de épocas (iterações) de treinamento ou o valor do erro, ambos pré-fixados, sejam atingidos primeiro pela rede.

Resumidamente, o modelo ANFIS ajusta, através do algoritmo *backpropagation*, os parâmetros das funções de pertinência, as quais serão de um tipo único (todas triangulares, todas gaussianas, etc), dependendo da escolha realizada. O método dos mínimos quadrados é usado para encontrar os coeficientes das funções lineares, que formam o consequente das regras *fuzzy*.

A aprendizagem da rede é obtida combinando o algoritmo de *backpropagation* e o método dos mínimos quadrados. Para cada época de treinamento o método é realizado através de uma passagem à frente (*forward step*) e uma passagem para trás (*backward step*). Na passagem à frente, para cada vetor de entrada, a rede é avaliada e os parâmetros do consequente são estimados usando o método de mínimos quadrados. Em seguida, são calculados os erros para cada par do conjunto de treinamento, ou seja, os erros são estimados pela soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e o observado. No passo para trás, os erros são propagados e os parâmetros dos antecedentes são modificados pelo mecanismo do algoritmo de *backpropagation* (BENINI e JUNIOR, 2008).

### 2.7.2.7 Aplicações da Lógica Fuzzy

Para ilustrar o conceito de Lógica *Fuzzy* citando algumas aplicações práticas são apresentadas.

Nos últimos anos a Lógica *Fuzzy*, como ferramenta de Raciocínio Aproximado, tem encontrado numerosas aplicações que vão desde o campo das finanças até a engenharia de terremotos. Todas elas correspondem a problemas muito complexos ou mal conhecidos, que por isto não admitem tratamento por métodos baseados na Lógica Clássica. De fato a introdução da Lógica *Fuzzy* têm permitido modelar e resolver situações tradicionalmente consideradas como intratáveis, e neste sentido constitui uma revolução em muitos campos (VIEIRA, 1999).

Em controle de processos industriais, área pioneira, as primeiras experiências datam de 1975 quando foi demonstrado no Queen College, Londres, que um controlador *fuzzy* muito simples controlou eficientemente uma máquina a vapor.

Dentre algumas aplicações pode ser citado como produto, o ar condicionado (Empresa Mitsubishi) que varia a potência a partir da quantidade de pessoas (através de sensores infravermelhos), permitindo economia de energia. Sistemas industriais incluem controle de grupo de elevadores (Hitachi, Toshiba), veículos auto-guiados e robôs móveis (Nasa, IBM), controle de motores (Hitachi), ventilação de túneis urbanos (Toshiba), controle de tráfego urbano, controle de parada e partida de trens de metrô (Sendai, Tokio). (GOMIDE e GUDWIN, 1994).

Vieira (1999) propõe a modelagem de um sistema de controle por Lógica *Fuzzy* empregado na secagem por atomização de produtos cerâmicos. Segundo o autor, com o emprego deste tipo de controle é esperado que ocorram: ganhos energéticos significativos, pela otimização do controle de temperaturas; tempos menores de armazenagem para homogeneização do produto, para garantir a uniformidade do produto atomizado; redução substancial de tempos de produção.

Na Espanha existe um significativo número de pesquisadores que desenvolvem seu trabalho no âmbito da Lógica *Fuzzy* e suas aplicações. Uma equipe interdisciplinar com membros procedentes de distintas universidades estão desenvolvendo o projeto

denominado ORBE (ORdenador Borroso Experimental) pelo patrocínio do Ministério de Indústria e Energia, com o objetivo geral de desenvolver arquiteturas de computadores capazes de realizar de um modo eficiente o processamento de informação *fuzzy* (VIEIRA, 1999).

As aplicações citadas são puramente ilustrativas, pois há diversas patentes e publicações de aplicações práticas relativas ao tema; porém observa-se claramente a contribuição da Lógica *Fuzzy* nos sistemas de controle e automação.

## CAPÍTULO 3. MATERIAIS & MÉTODOS

No intuito de se alcançar o objetivo proposto neste trabalho, foi escolhido o trocador de calor existente na instalação piloto do Edifício Prof. Walter Borzani para servir de protótipo de planta industrial a ser submetida ao processo de limpeza CIP. Foi escolhido o leite como matéria prima alimentar a ser estudada, por se tratar de alimento tipicamente consumido no mercado brasileiro e cujo processamento industrial utiliza em larga escala os sistemas de limpeza CIP.

### 3.1 *Materiais utilizados*

Na Figura 3.1 são apresentados os equipamentos e a instrumentação utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

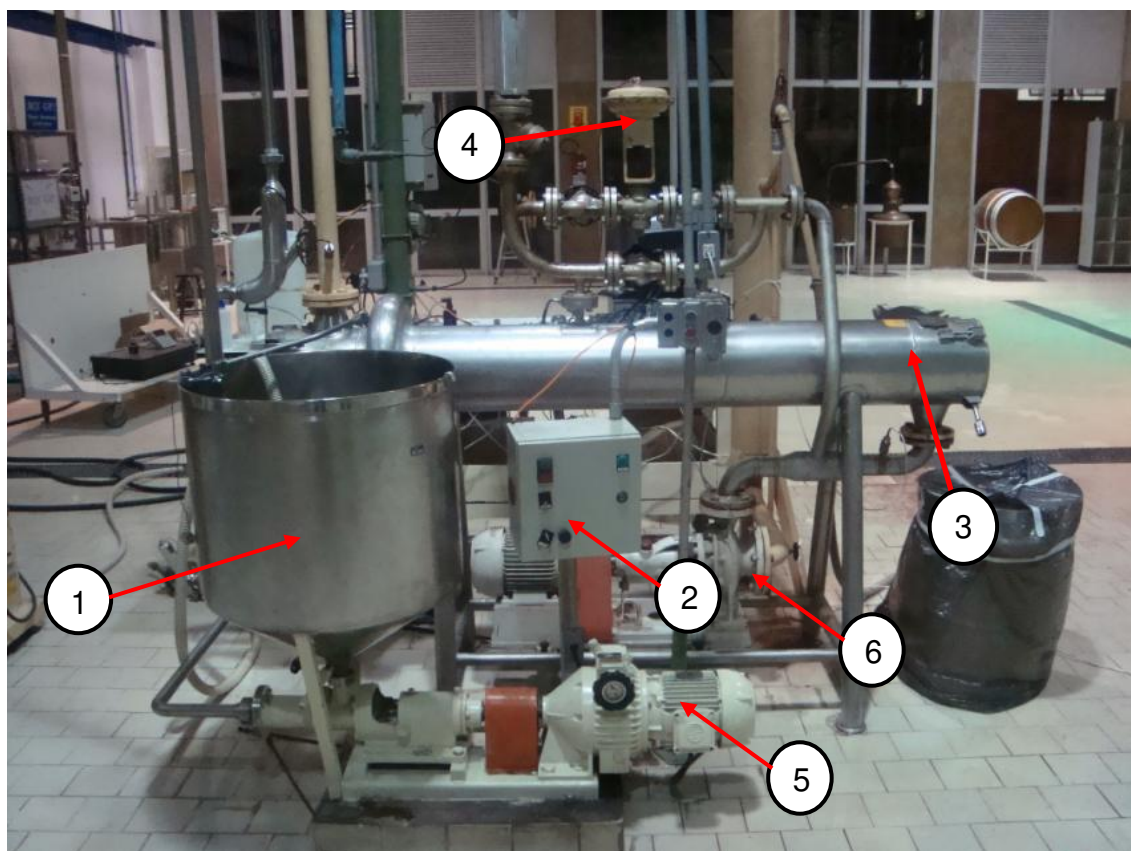


Figura 3.1 – Equipamentos e instrumentação para o processo de limpeza CIP

Na qual,

- 1 - Reservatório a partir de onde será inserido e recirculado o fluido do processo;
- 2 - Quadro do inversor de frequência;
- 3 - Trocador de calor;
- 4 - Válvula eletropneumática proporcional;
- 5 - Bomba de deslocamento positivo;
- 6 - Bomba centrífuga.

O funcionamento do sistema estudado é definido pela circulação do produto pelos tubos, promovido por uma bomba de deslocamento positivo (5), fazendo com que o fluido do processo no estado líquido seja submetido a quatro passagens no interior dos tubos do trocador de calor. A bomba centrífuga (6) é responsável pela circulação da água de aquecimento através da carcaça do trocador de calor. A temperatura da água de aquecimento é ajustada por meio da válvula de controle (4) que é responsável por manipular a vazão de vapor de água saturado, gerado por uma caldeira do tipo flamotubular instalada em ambiente próprio e adequado para o seu funcionamento adequado e seguro.

Na Figura 3.2 (a) é apresentado um diagrama esquemático simplificado (fora das normas e simbologias de instrumentação) do sistema utilizado e na Figura 3.2 (b) um diagrama representativo do processo e da instrumentação.

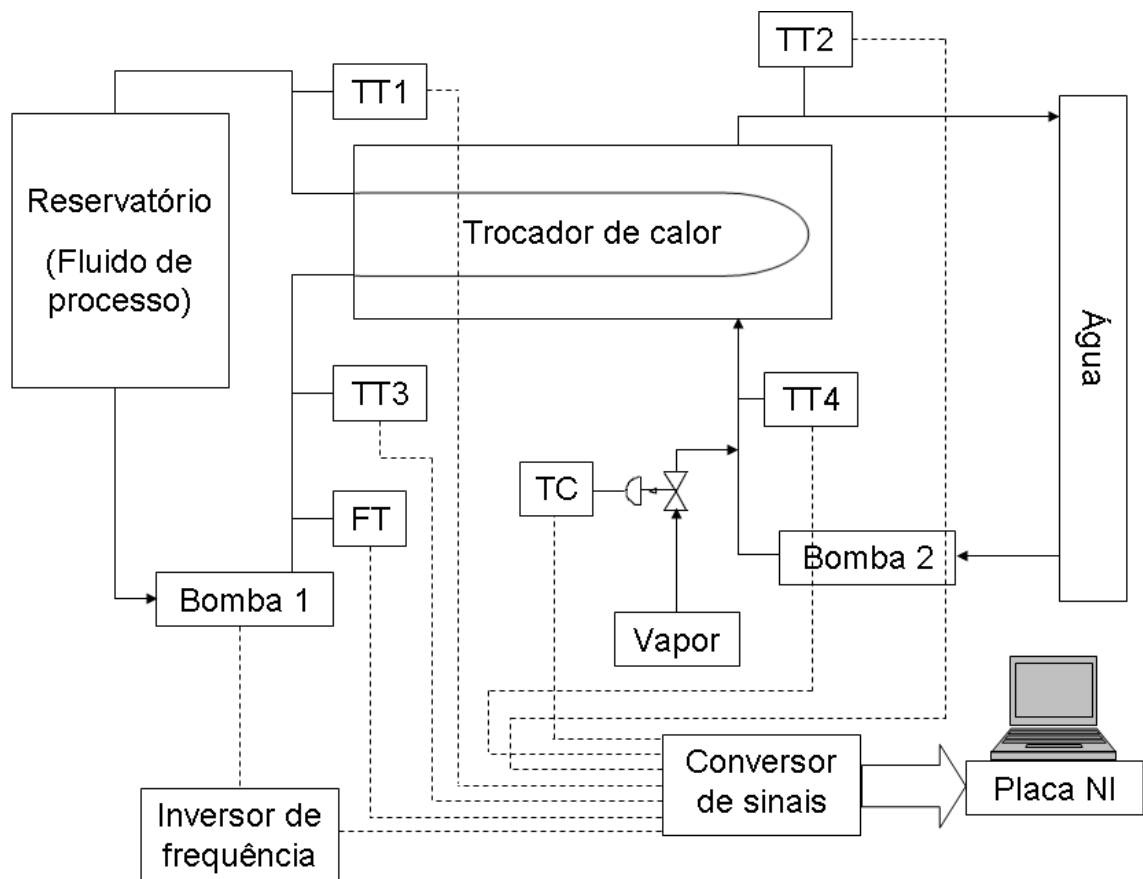


Figura 3.2a – Diagrama esquemático simplificado do sistema

Na qual,

TT1: Medição da temperatura do fluido de processo na saída do trocador de calor;

TT2: Medição da temperatura de saída da água quente;

TT3: Medição da temperatura do fluido de processo na entrada do trocador de calor;

TT4: Medição da temperatura de entrada da água quente;

FT: Medição da vazão do fluido de processo na entrada do trocador de calor;

TC: Controle de temperatura da água de aquecimento.



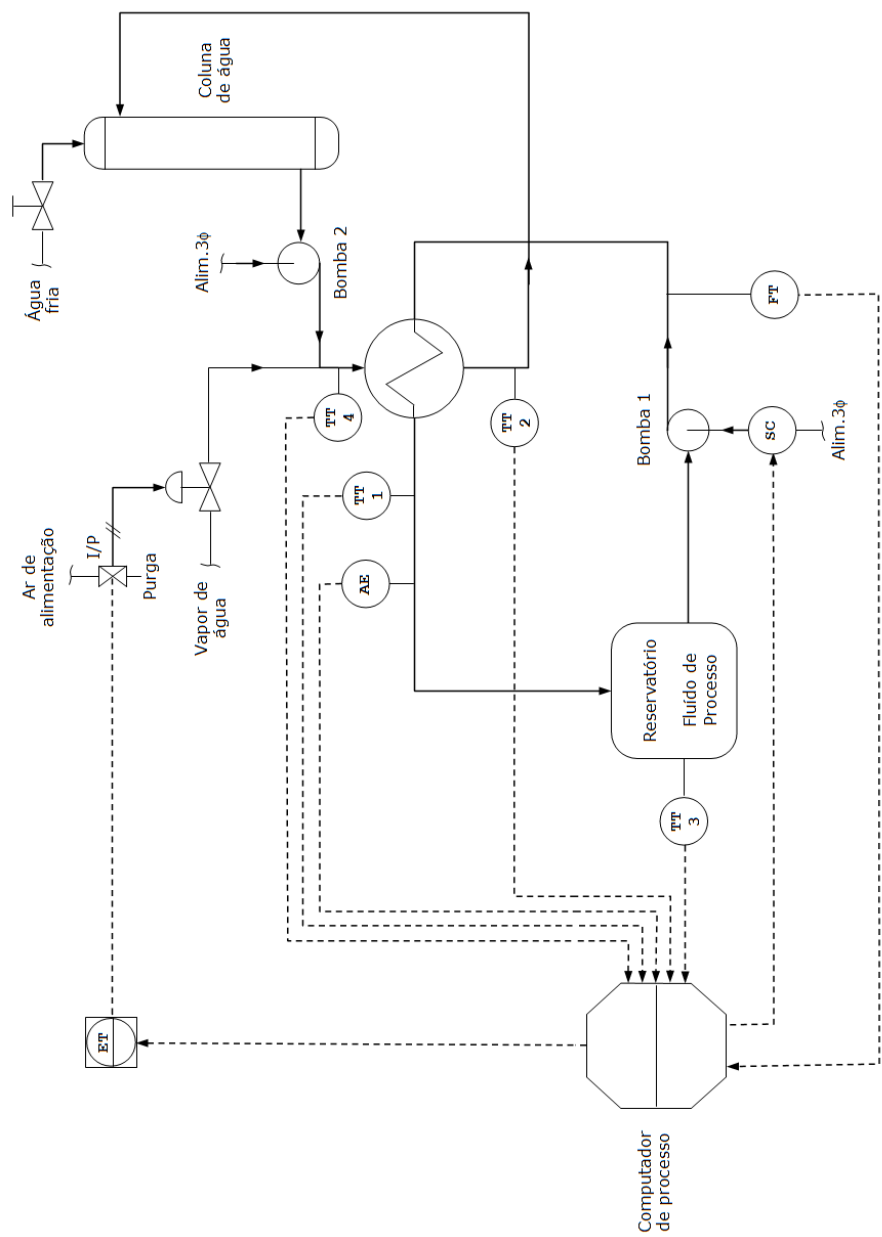


Figura 3.2b – Diagrama representativo do processo e da instrumentação

O sistema eletrônico de coleta de dados utilizado foi composto pelos seguintes itens: (i)- um microcomputador do tipo PC já existente; (ii)- uma placa de aquisição de dados do fabricante NATIONAL INSTRUMENTS, modelo: NI PCI-6259, com capacidade para até 4 saídas analógicas de 16 bits, 48 entradas e saídas digitais e faixa de operação de -10 V a +10 V e (iii)- do aplicativo LabVIEW, utilizado para realizar

o monitoramento, aquisição de dados e controle do processo. Na Figura 3.3 é apresentada uma ilustração da placa de aquisição de dados utilizada e a Figura 3.4 ilustra a placa borneira empregada nos experimentos.

Foram utilizadas quatro entradas analógicas para a medição das temperaturas, uma entrada analógica para medição da vazão, uma saída analógica para controle do inversor de frequência e uma saída analógica para controle da válvula proporcional de pressão.

Foi desenvolvida a configuração de aplicativo computacional (LabVIEW) dedicado à coleta dos dados adquiridos em experimentos realizados, dentre eles: vazão, temperaturas e pH.



Figura 3.3 – Placa de aquisição de dados usada no trabalho Fonte: National Instruments, 2012

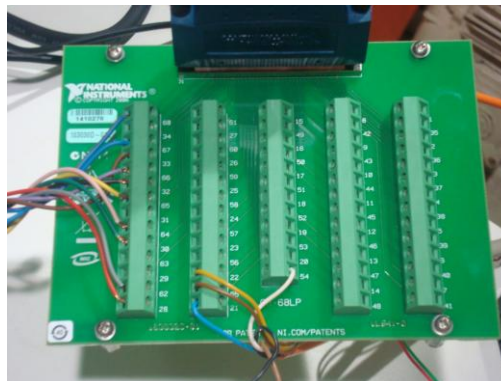


Figura 3.4 – Régua de bornes usada no trabalho

O aplicativo LabVIEW (acrônimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica criada pela empresa NATIONAL INSTRUMENTS™.

Como mencionado 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 Edifício Prof. Walter Borzani do CEUN-IMT.

Como produto de processamento nos tubos internos do trocador de calor ou simplesmente fluido de processo, escolheu-se o leite, por se tratar de matéria-prima alimentar cujo beneficiamento é alvo de importante cuidado com a higienização e limpeza dos equipamentos envolvidos.

O experimento foi 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<sup>®</sup>, na linguagem de programação gráfica denominada “G” (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010)

O LabVIEW<sup>®</sup> teve sua primeira versão disponibilizada em 1986 para máquinas Macintosh e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os Sistemas Operacionais Windows<sup>®</sup>, Linux e Solaris<sup>®</sup>. Os principais campos de aplicação do LabVIEW<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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.

O trocador de calor (P1) é de fabricação Vettori–Manghi, modelo 1978 (VETTORI-MANGHI, sd). Seu funcionamento consiste na circulação do produto ou fluido 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 3.5, feito em 4 passagens, conforme apresentado na Figura 3.6 e esquematizado na Figura 3.7. Nos tubos, o fluido 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 fluido 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 3.8, onde a válvula (V1) permite interromper a passagem do fluido 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 3.8).

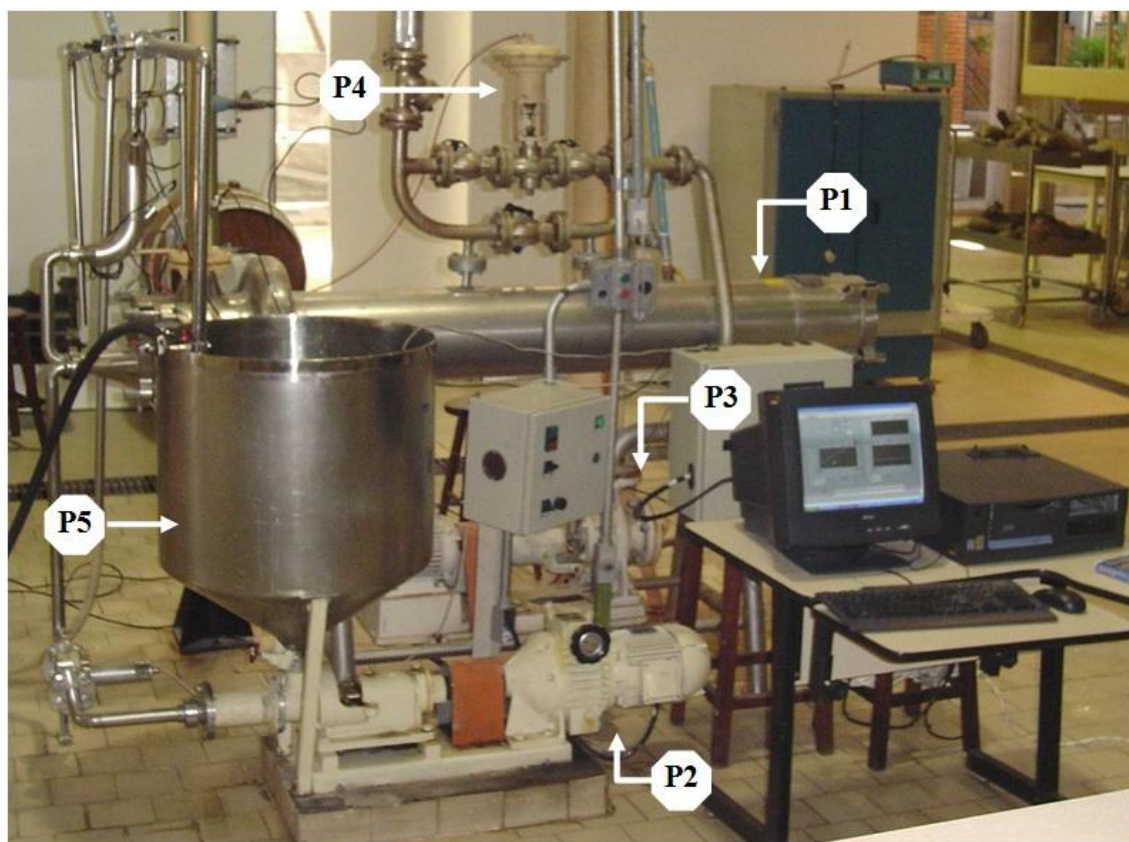


Figura 3.5 - Planta com trocador de calor tipo feixe tubular instrumentado

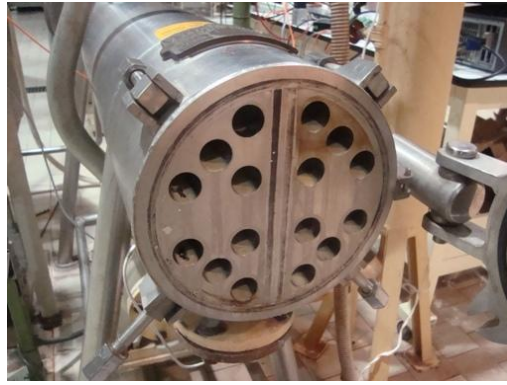


Figura 3.6 - Tubos internos do trocador de calor para o fluido de processo

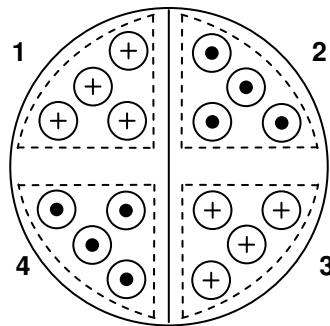


Figura 3.7 - Seções de passagem do fluido de processo nos tubos do trocador de calor

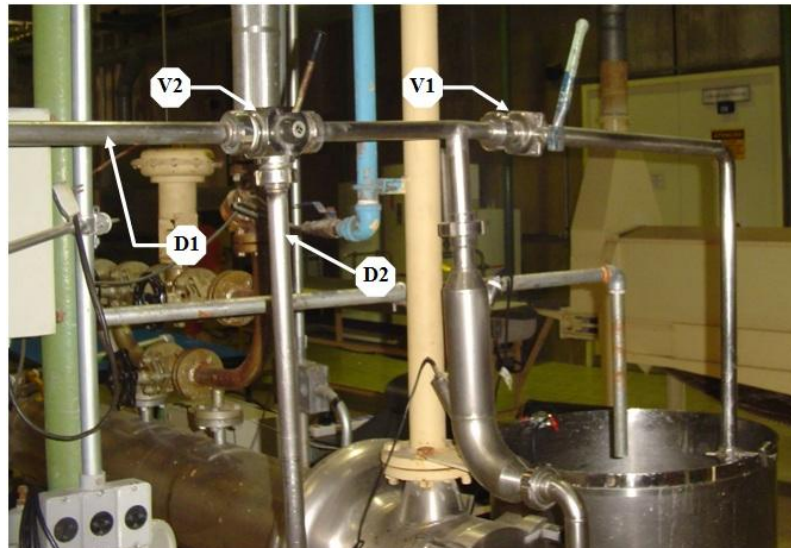


Figura 3.8 - Válvulas para manobra da saída do fluido de processo ao reservatório de entrada ou descarte

O deslocamento do fluido de processo nos tubos internos do trocador de calor é promovido por uma bomba centrífuga de deslocamento positivo (P2) mostrada na Figura 3.5, 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 3.9 (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).

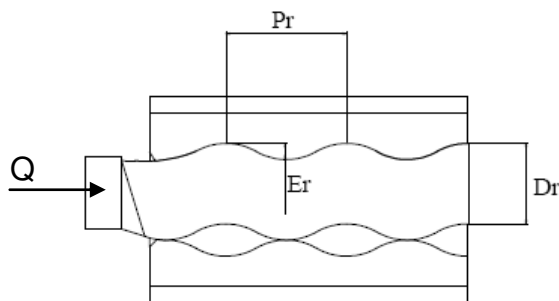


Figura 3.9 - Rotor helicoidal de bomba centrífuga

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 3.5, fabricação Robuschi, 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 fluido 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 3.10 à Figura .



Figura 3.10 - Bomba de deslocamento para fluido de processo



Figura 3.11 - Bomba centrífuga para circulação de água quente



Figura 3.12 - Válvula pneumática da malha de controle de temperatura

Para efetuar as medições das quatro temperaturas envolvidas no processo, utilizaram-se elementos sensores de temperatura do tipo termoresistor PT 100, 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 por 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 fluido de processo é ilustrado na Figura 3.13 e das temperaturas da água de aquecimento na Figura 3.14.





Figura 3.13 - Posicionamento dos elementos de medição de temperatura da entrada (T3) e saída (T1) do fluido de processo



Figura 3.14 - 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 termorresistivos 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 fluido a ser medida, neste caso, máxima em 100°C; faixa da vazão do fluido de processo, que ocorre entre 3 L.min<sup>-1</sup> e 16 L.min<sup>-1</sup>. O sistema escolhido é de fabricação METROVAL modelo OI-2 SMRX/FS (METROVAL, 2010), cuja vista interna do sistema mecânico é ilustrada na Figura 3.15 e opera pelo princípio de engrenagens ovais, conforme ilustra a Figura 3.16. Este equipamento atende plenamente às condições exigidas, nos aspectos de repetibilidade, precisão, neutralização aos agentes químicos envolvidos e robustez física.

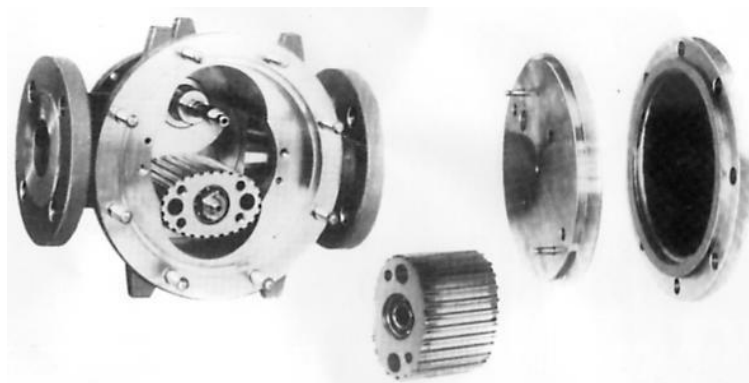


Figura 3.15 - Vista interna do medidor de vazão (METROVAL, 2007)

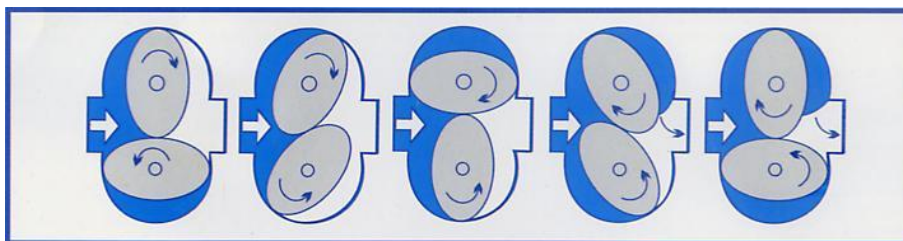


Figura 3.16 - Esquema com princípio de funcionamento das engrenagens ovais do medidor de vazão (METROVAL, 2007)

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 3.17 ilustra o medidor de vazão instalado na planta e a Figura 3.18 a unidade conversora de sinal pulsante para analógico.



Figura 3.17 - Instalação do medidor de vazão METROVAL modelo OI - 2 SMRX/FS



Figura 3.18 - 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 3.19 (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. A Figura 3.20 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. Um programa desenvolvido na plataforma LabVIEW® captura o dado existente no arquivo texto de modo a obter o referencial de leitura do pH.

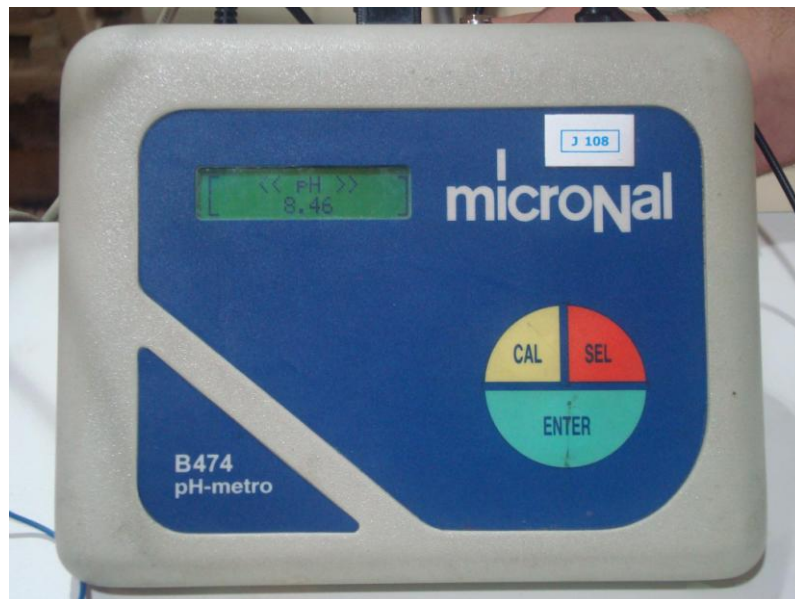


Figura 3.19 - Medidor de pH MICRONAL, modelo B-474 - phmetro

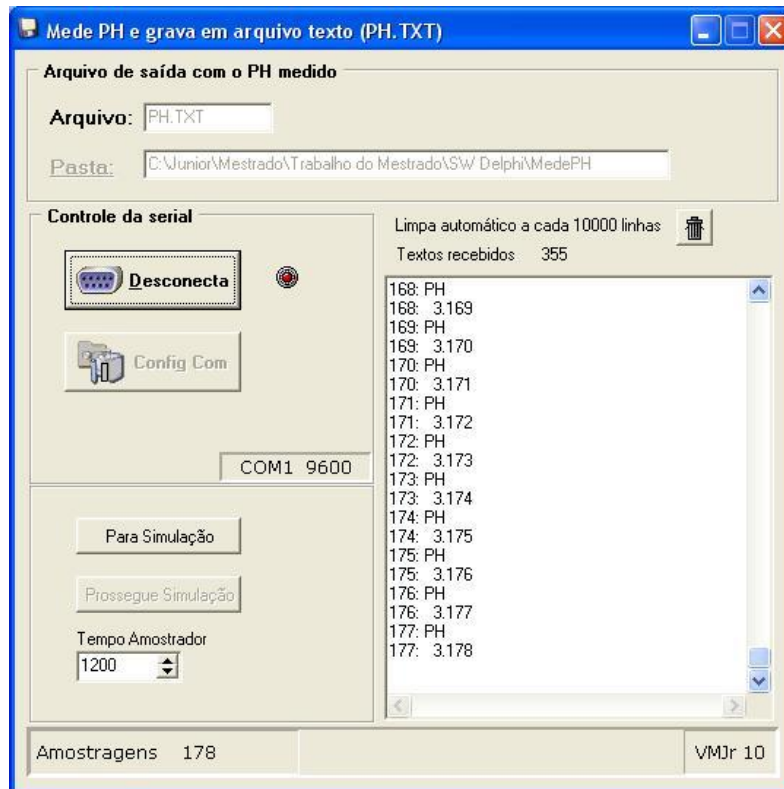


Figura 3.20 - Tela do programa para leitura do sinal serial de pH.

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 A**. A Figura 3.21 ilustra o inversor de frequência utilizado para tal finalidade.



Figura 3.21 - Inversor de frequência



O sinal de controle enviado para a válvula pneumática 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 pneumática, 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 3.22, marca ENGINSTREL, modelo 621IPB, cuja entrada opera na faixa de 4 a 20 mA (ENGINSTREL, 2010).



Figura 3.22 - Conversor I/P ENGINSTREL modelo 621IPB

A Figura 3.23 ilustra os conversores utilizados para compatibilizar os sinais de entrada das medidas das temperaturas T1 a T4 (quatro conversores à direita) e sinal de saída para controle da válvula eletropneumática de vapor (a esquerda).

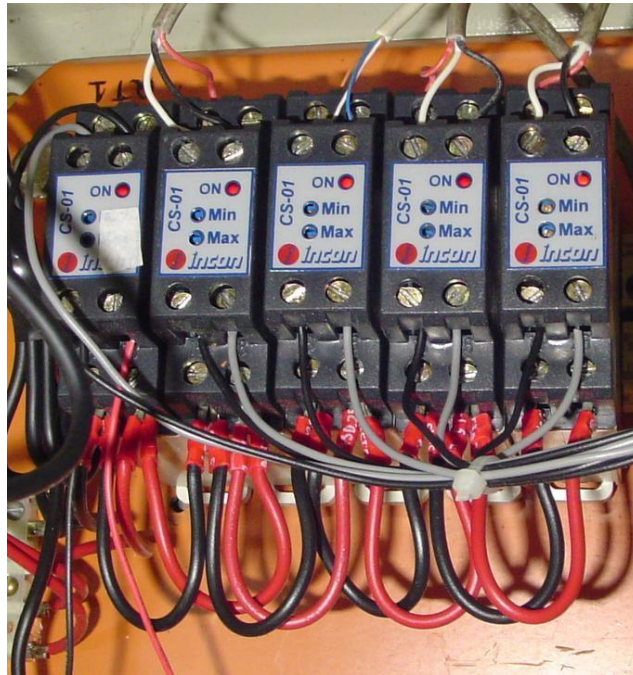


Figura 3.23 - Condicionadores de sinais para medidas de temperaturas e atuação no conversor I/P da válvula eletropneumática de vapor.

### **3.2 Metodologia empregada**

Para se determinar o comportamento do pH da saída do fluido de processo em função da vazão e da temperatura na etapa de enxágue de um processo CIP, o método utilizado foi dividido nas etapas apresentadas a seguir:

- (i)** Ensaio para obtenção das curvas de resposta do sistema, no caso as respostas dinâmicas de vazão e temperatura do fluido de processo, visando sintonizar os controladores em malha fechada para estas duas variáveis de processo;
- (ii)** Ajustar os parâmetros de sintonia de controladores PI e PID para controle de vazão e temperatura do fluido de processo, baseada em modelos aproximados determinados a partir das curvas do item **(i)**;

- (iii) Ensaios no trocador de calor para obtenção dos dados experimentais usados para validar os modelos matemáticos da etapa de enxágue do processo CIP, relacionando o pH da saída do fluido de processo em função da temperatura e vazão do mesmo, utilizando os controladores determinados em (ii);

### 3.2.1 Metodologia empregada para obtenção das curvas de resposta de vazão e temperatura

Nesta etapa é estudado o comportamento dinâmico da temperatura de saída e vazão do fluido de processo quando introduzidas alterações, respectivamente, na válvula de controle de passagem de vapor e no controle de velocidade da bomba de fluxo do fluido 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 fluido de processo.

Utilizando-se a plataforma LabVIEW<sup>®</sup>, foi desenvolvido um programa para controle, inicialmente, em malha aberta<sup>12</sup> da vazão e temperatura do fluido de processo, possibilitando a coleta e registro das seguintes variáveis: ajuste de velocidade da bomba centrífuga do fluido de processo, ajuste da posição da válvula de vapor, medida de vazão do fluido de processo (FT), medidas das temperaturas (TT1 a TT4) referentes ao fluido de processo e à água quente do corpo do trocador de calor, medida do pH na saída do fluido de processo. A tela principal e o diagrama em blocos do *software* utilizado podem ser vistos no **APÊNDICE B**.

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

---

<sup>12</sup> Nesta etapa os controles de temperatura e vazão não são automatizados, sendo seus ajustes executados de forma manual em escala 0 a 100%.



- rotação da bomba (%): ajuste de 0 a 100 % do sinal de saída para controle da bomba de deslocamento do fluido de processo, possibilitando monitorar o valor do sinal em volts;
- abertura 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 fluido 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 (**temperatura constante**), 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 fluido 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 (**vazão constante**), sendo seus intervalos suficientes para que houvesse estabilização dos valores medidos.

Nos experimentos citados acima, utilizou-se água como fluido 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, conforme já citado, 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 e Chen, 2006), aproximando-se das características da água quanto ao escoamento.

Os dados foram registrados em arquivos texto e transferidos para uma 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 (2.5).

### *3.2.2 Metodologia empregada para sintonia dos controladores*

Obtidas as curvas de resposta da vazão e temperatura do fluido de processo, foi realizada a simulação utilizando a aplicativo SIMULINK / MATLAB<sup>®</sup>, 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 4.2.

Feitas as simulações na plataforma MATLAB<sup>®</sup>, aplicaram-se os métodos que apresentaram melhores resultados diretamente na planta, utilizando a plataforma do LabVIEW<sup>®</sup> para implementação dos controladores em malha fechada e monitoração das variáveis alvo: vazão e temperatura do fluido de processo. O programa desenvolvido possibilita ajuste no *set-point* da vazão de 3 L.min<sup>-1</sup> a 16 L.min<sup>-1</sup> 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<sup>®</sup> do sistema são apresentadas no **APÊNDICE C**.

### 3.2.3 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 fluido 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 3.24 ilustra o fluxograma com os procedimentos utilizados para a análise do processo CIP proposto, destacando em negrito a etapa de enxágue em estudo.

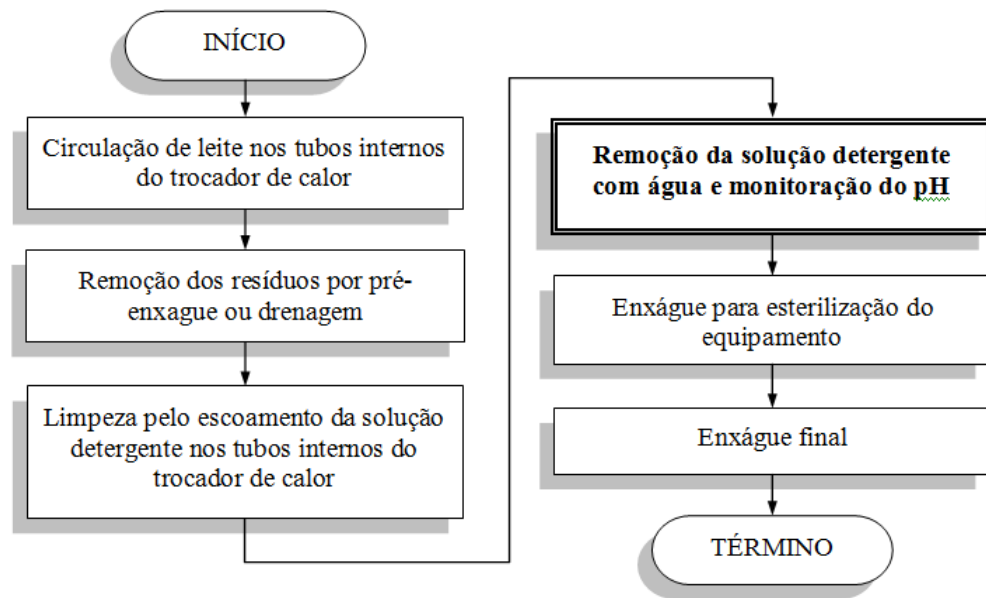


Figura 3.24 - Fluxograma básico com as etapas do processo CIP para estudo da etapa de enxágue.

A Figura 3.25 fornece um diagrama de blocos com as malhas de controle utilizadas para obtenção dos dados para a modelagem, permitindo melhor percepção das grandezas envolvidas nesta etapa. Como toda aquisição e controle foram desenvolvidos usando-se LabVIEW<sup>®</sup>, variáveis internas como *TM* (temperatura manipulada) e *QM* (vazão manipulada), podem ser facilmente registradas.

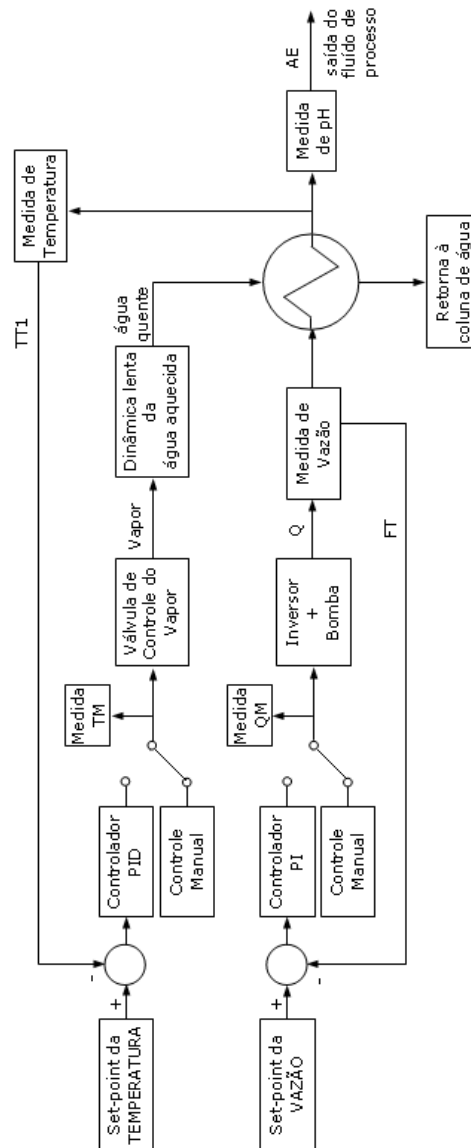


Figura 3.25 - Diagrama em blocos do processo para etapa da obtenção dos dados para a modelagem não paramétrica

A seguir são descritos com mais detalhes as etapas experimentais realizadas, na instalação objeto do estudo, tendo como base o fluxograma da Figura .

### 3.2.3.1 Metodologia para criar a incrustação no interior dos tubos do trocador de calor

Anteriormente ao processo de incrustação foram realizados testes em laboratório destinados a determinar a influência da temperatura de operação para a etapa.

Para tal, foi realizado o procedimento descrito a seguir:

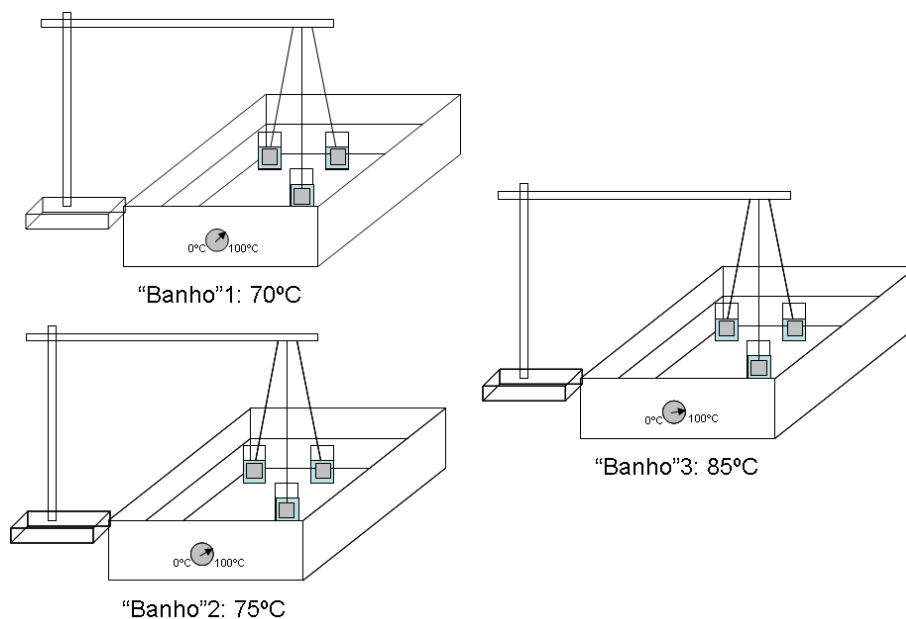


Figura 3.26 - Representação do sistema de estudo da incrustação

- i. Ajuste de banhos termostáticos: "Banho 1" a 70°C, "Banho 2" a 75°C e "Banho 3" a 85°C, conforme Figura 4.6;
- ii. Inserção de 9 placas de aço (9cmX9cm) AISI 304 (já higienizadas) em estufa (T = 105°C) durante 1 hora;
- iii. As placas de aço foram retiradas da estufa, pesadas, identificadas, foram presas por fios de Nylon (para pendurá-las no suporte universal) e inseridas novamente na estufa desligada, para mantê-las em temperatura superior à ambiente;
- iv. Foi adicionado o leite cru em 9 béqueres e posicioná-los nos "Banhos 1, 2 e 3";
- v. Inserção de 1 placa em cada béquer (totalmente imersa ao leite), "pendurada" devidamente no suporte universal pelos fios de Nylon conforme figura 3.26;
- vi. Iniciada a contagem do cronômetro (tempo = 1 hora);

Durante esta etapa do experimento, as temperaturas dos banhos termostáticos foram constantemente aferidas (a fim de assegurar seu controle – aumentando/diminuindo as temperaturas dos banhos), e foi retirada a nata que se

formava.

- vii. Ao final dos tempos cronometrados dos banhos termostatzados, as placas foram devidamente retiradas dos béqueres e inseridas em estufa durante 4 horas ( $T = 105^{\circ}\text{C}$ );
- viii. Foram desumidificados (inserindo-os na estufa) e pesados 9 vidros de relógio e, em seguida, identificados;
- ix. Inserção de cada uma das placas em um vidro de relógio (cada um dos vidros de relógio de massa conhecida e desumidificado);
- x. Os vidros de relógio foram inseridos (com as placas de aço) na sílica-gel dessecante (dessecador) durante 3 horas;
- xi. Em seguida, os vidros de relógio foram pesados e identificados.

Na Tabela 3.1 abaixo são apresentados os resultados experimentais do estudo da incrustação, sendo que:

- i.  $M_i$  placa = massa inicial da placa (em gramas);
- ii.  $M_{vr}$  = massa do vidro relógio (em gramas);
- iii.  $M_f$  placa + vr = massa da placa no vidro relógio após teste (em gramas);
- iv.  $M_f$  placa = massa final da placa (em gramas);
- v.  $M$  leite = massa de leite na placa ao final do teste (em gramas);
- vi.  $M_{med}$  leite = massa média de leite na placa ao final do teste (em gramas);

Tabela 3.1 – Resultados experimentais do estudo da incrustação

Temperaturas	M <sub>i</sub> placa (g)	M vr (g)	M <sub>f</sub> placa + vr (g)	M <sub>f</sub> placa (g)	M leite (g)	M <sub>med</sub> leite (g)
70 °C	23,3923	44,2137	67,6355	23,4218	0,0295	0,0292
	23,3066	44,5572	67,8894	23,3322	0,0256	
	23,3488	41,6724	65,0538	23,3814	0,0326	
77 °C	23,3767	44,8631	68,264	23,4009	0,0242	0,0250
	23,3101	37,9987	61,3319	23,3332	0,0231	
	23,3208	42,9223	66,2709	23,3486	0,0278	
83 °C	23,3031	45,2386	68,5659	23,3273	0,0242	0,0289
	23,4466	45,5516	69,0259	23,4743	0,0277	
	23,3386	44,9773	68,3506	23,3733	0,0347	

Observa-se que a massa média de leite na placa ao final do teste (M<sub>med</sub> leite) não apresenta variação sensível para as temperaturas utilizadas. Os resultados sugerem que, na faixa de estudo, a temperatura não influencia significativamente na incrustação; logo, optou-se por trabalhar com a temperatura de 80 °C para a incrustação (temperatura intermediária na faixa estudada), por ser de fácil controle no sistema utilizado.

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

- i. Colocou-se o leite em circulação no trocador de calor por cerca de uma hora<sup>13</sup>, com temperatura e vazão controladas em respectivamente 80 °C e 6 L.min<sup>-1</sup>;
- ii. Aguardou-se, com o trocador de calor em repouso por aproximadamente uma hora, para a consolidação do processo de incrustação nas paredes do mesmo.

### 3.2.3.2 Metodologia para a higienização do trocador de calor

Esta etapa consiste em remover os resíduos de leite do interior dos tubos. No caso do equipamento utilizado, procedeu-se da forma descrita a seguir considerando que o mesmo possui apenas um reservatório para alimentação de entrada:

- i. Ajustou-se o set-point do controlador de temperatura para 50°C;

<sup>13</sup> 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.

- ii. Ajustou-se a abertura das válvulas direcionais disponíveis na instalação estudada (vide Figura 3.5), de modo que a tubulação de saída responsável pelo transporte do leite remanescente da etapa anterior contido no interior do trocador de calor fosse direcionada ao descarte;
- iii. 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 mínimo<sup>14</sup>;
- iv. Atingido o nível mínimo, foi aberta a válvula de bloqueio responsável pela alimentação da água proveniente da rede de utilidades do laboratório, na temperatura ambiente<sup>15</sup>;
- v. Ao término da fase de circulação do 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 3.5), mantendo-o em circulação no trocador de calor;
- vi. Aguardou-se a temperatura da saída do fluido de processo estabilizar novamente em 50°C;
- vii. Adicionou-se NaOH no reservatório de entrada, de modo que a solução detergente final seja 0,5 % em massa<sup>16</sup>, valor comumente utilizado na indústria, para obter solução altamente alcalina com pH por volta de 12 (GEDRAITE et al., 2010);
- viii. Manteve-se circulação da solução detergente (NaOH) pelo período de uma hora com vazão controlada em 9 L.min<sup>-1</sup> e temperatura fixa em 50°C.

---

<sup>14</sup> 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.

<sup>15</sup> 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.



### *3.2.3.3 Metodologia para a execução da etapa de enxágue: remoção da solução detergente com água e monitoração do pH*

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 (variação da temperatura com vazão constante e variação da vazão com temperatura constante) nos quais se faz necessário, a princípio, reiniciar e executar as duas etapas anteriores, de criação da incrustação (detalhada no item 3.2.3.1) e de sanitização (detalhada no item 3.2.3.2).

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).

### *3.2.3.4 Metodologia para a execução da etapa de 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:

- i. Terminada a circulação da solução detergente, manobra-se as válvulas direcionais disponíveis na planta de modo que a solução (fluído de processo)

---

<sup>16</sup> O volume total de líquido (fluído 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.

seja direcionada ao tanque intermediário de saída, para medição do pH e descarte;

- ii. Aguarda-se até que a solução de NaOH chegue ao fim do reservatório de entrada do fluido 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;
- iii. Aguarda-se até o momento em que o pH da saída do fluido 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;
- iv. Repete-se o procedimento para vários valores de temperatura.

#### 3.2.3.5 Metodologia para a execução da etapa de enxágue com variação da vazão

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

- i. Terminada a circulação da solução detergente, manobram-se as válvulas direcionais de modo que a solução (fluido de processo) seja direcionada ao tanque intermediário de saída, para medição do pH e descarte;
- ii. Aguarda-se até que a solução de NaOH chegue ao fim do reservatório de entrada e desliga-se a bomba de escoamento do fluido de processo;
- iii. 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;
- iv. Aguarda-se até o momento em que o pH da saída do fluido 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;

- v. Repete-se o procedimento para vários valores de vazão.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTIDOS**

### **4.1 *Curvas de respostas de vazão e temperatura***

As curvas de resposta temporal da vazão e da temperatura do fluido de processo foram obtidas conforme descrito no item 3.2.1, onde é descrita a metodologia empregada.

Foram realizados ensaios para a obtenção dos parâmetros de processo referentes à vazão, cujo comportamento temporal é ilustrado nas Figuras 4.1a e 4.1b. O comportamento apresentado na Figura 4.1a é o da variável desvio da variável de processo (PV) – diferença entre a PV e a PV em regime permanente (considerada 9,5 L.min<sup>-1</sup>) e a Figura 4.1b apresenta o comportamento da MV (sinal enviado ao inversor de frequência).

Neste ensaio partiu-se com o sinal enviado ao inversor de frequência (MV) em 7 V (70% da rotação máxima da bomba) e aplicou-se degrau positivo de 3 V no tempo 32 s, aguardou-se a estabilização da vazão (PV), e em seguida aplicou-se degrau negativo de 3 V no tempo 203 s. Observam-se dinâmicas de resposta da PV diferentes para o degrau positivo e para o degrau negativo da MV; a dinâmica é claramente mais lenta para o aumento da vazão devido a problemas de coleta de dados durante o ensaio - falhas na leitura do medidor de vazão e/ou placa de aquisição de dados - pois na prática a dinâmica tanto para aumento quanto para redução da vazão bastante parecido. Adotou-se o segundo degrau (10 V a 7 V – ou seja, de 100% para 70% da rotação da bomba) para obtenção dos parâmetros de processo, por representar a dinâmica de maneira mais próxima à prática (coleta de dados realizada sem problemas). Os resultados são apresentados ao longo deste item. Foi utilizada água nesta etapa do ensaio.

Ressalta-se que, para esta análise, optou-se por trabalhar com a variável desvio da vazão – VD – sendo esta a diferença entre a PV e a PV em regime permanente (9,5 L.min<sup>-1</sup>); em outras palavras, na prática a PV variou de 9,5 L.min<sup>-1</sup> para 13 L.min<sup>-1</sup>.

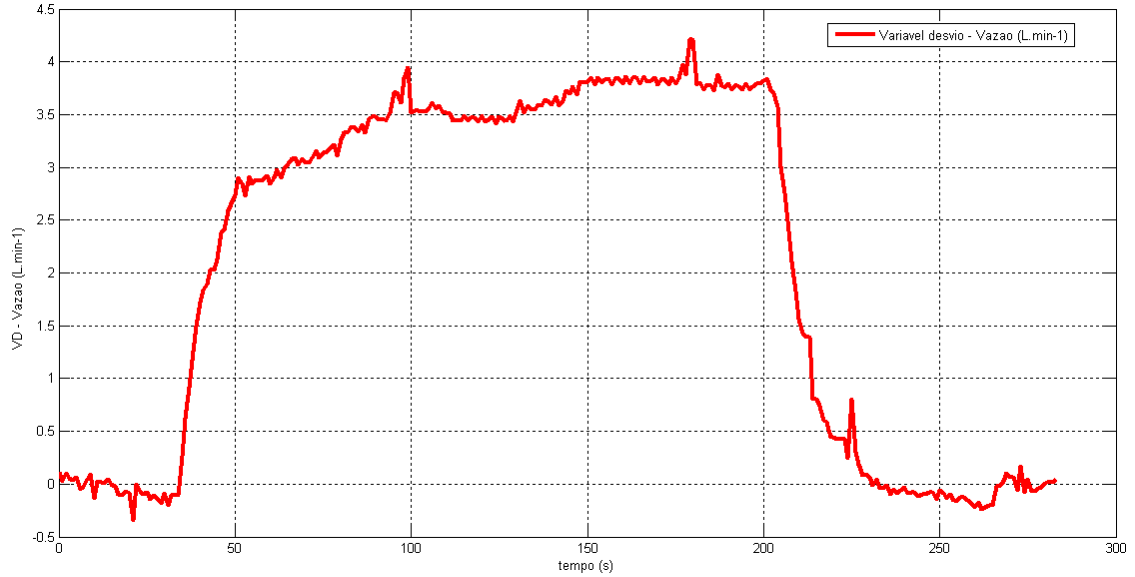


Figura 4.1a - Variável desvio - vazão PV (Variação da MV de 7 V para 10 V)

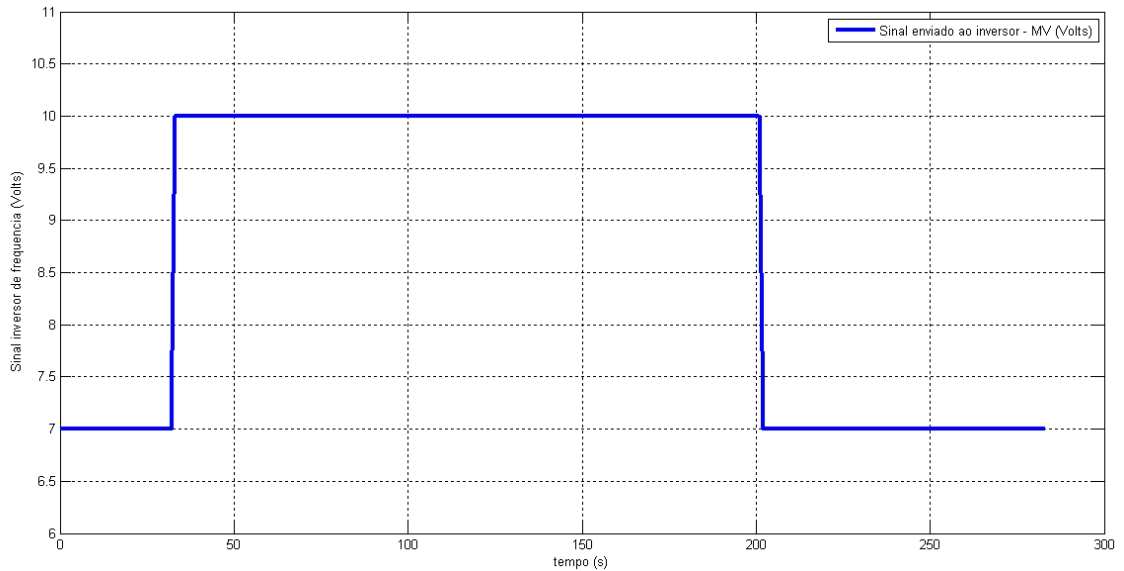


Figura 4.1b - Sinal enviado a inversor de frequência (MV) com degraus simétricos de 7 V para 10 V

No ensaio utilizado para a temperatura, cujo comportamento temporal é ilustrado nas Figuras 4.2a e 4.2b, utilizou-se vazão constante de 9 L.min<sup>-1</sup>. Ressalta-se que a válvula de vapor utilizada apresenta desgaste mecânico e sua resposta somente é

condizente com a realidade a partir de um sinal de comando em torno de 30% - 40% de abertura.

O comportamento apresentado na Figura 4.2a é o da variável desvio da PV – diferença entre a PV e a PV em regime permanente (considerada 30°C) e a Figura 4.2b apresenta o comportamento da MV (sinal enviado à válvula proporcional de vapor).

Partiu-se com a saída do fluído de processo na temperatura aproximada de 30°C, aplicou-se degrau na abertura da válvula de vapor instalada na linha de vapor de água saturado em 40 % em  $t=105$  s. Em  $t=800$  s aplicou-se um degrau até a abertura de 45 % da válvula, e em  $t=1052$  s aplica-se um degrau até a abertura de 55%.

Com relação ao segundo degrau, observou-se que a variação da MV foi muito pequena (5%, uma perturbação muito pequena), com conseqüente variação muito pequena na PV sendo esta inadequada à modelagem, optando-se assim pela aplicação do terceiro degrau (10%), sendo esta uma perturbação que representou variação na PV. Vale ressaltar que, quanto maior a abertura da válvula de vapor, maior será a mistura de vapor de água saturado à água de aquecimento do casco do trocador de calor, tendendo a temperatura do processo (PV) a entrar em regime num valor mais elevado, o que leva a uma situação de crítica com relação à segurança. Logo esta etapa do ensaio foi encerrada antes que a PV entrasse em regime estacionário.

Logo, as análises para obtenção dos parâmetros de processo foram realizadas adotando-se o primeiro degrau (0% - 40%) por a PV apresentar uma resposta mais clara à variação da MV, além de tender ao regime estacionário.

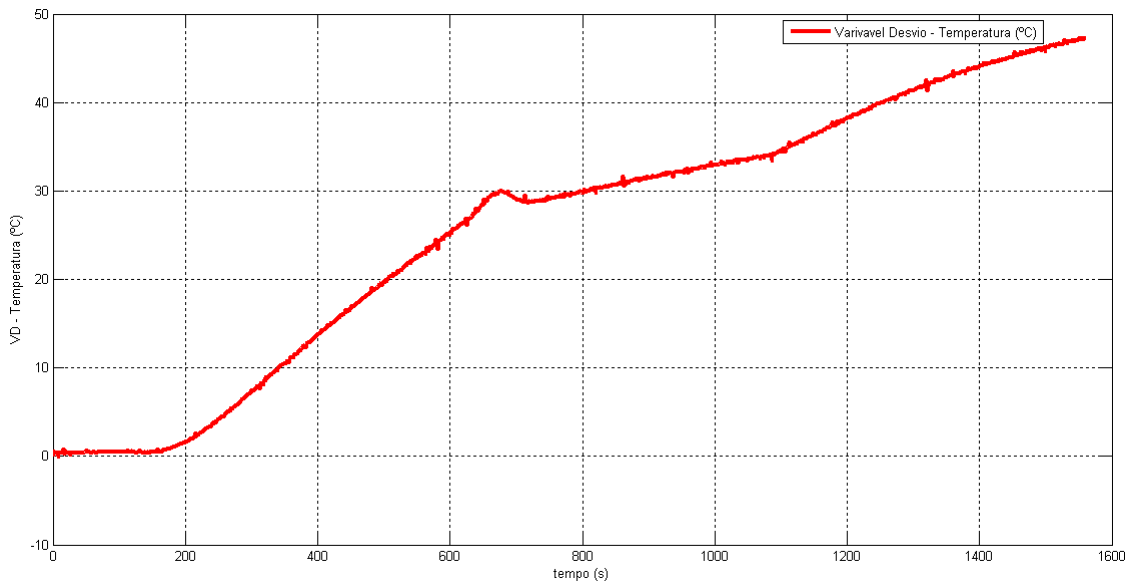


Figura 4.2a - Variável desvio - Temperatura PV à variações da MV

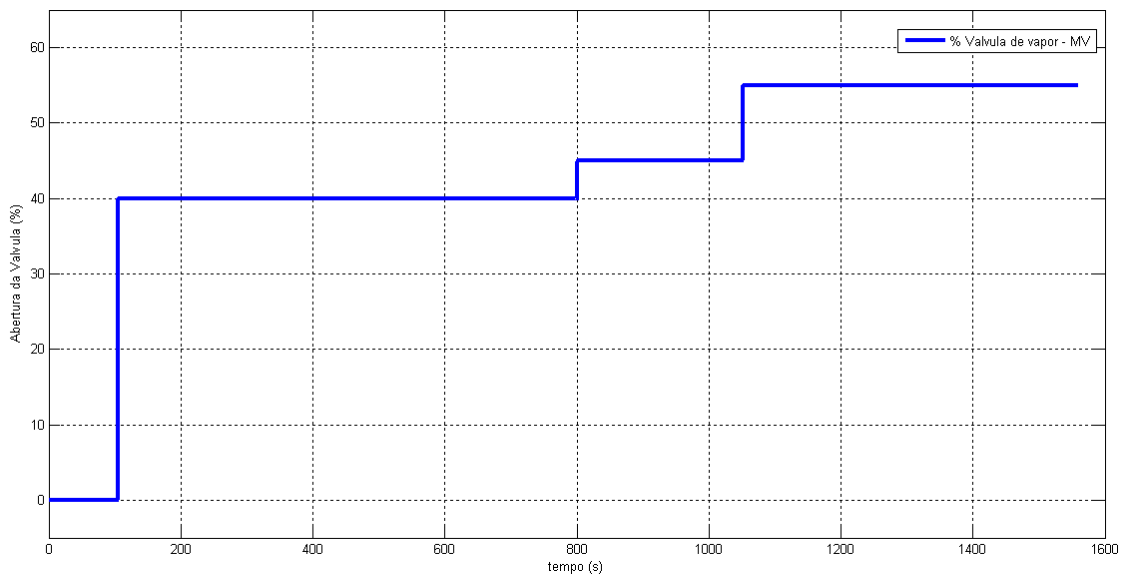


Figura 4.2b – Abertura da válvula de vapor (MV)

Os parâmetros do processo, sendo  $K$  o ganho do processo,  $\tau$  a constante de tempo do processo e  $\theta$  o atraso de transporte, foram calculados segundo dois métodos citados em 2.7.1, métodos de *Smith* e *Miller*, os quais forneceram resultados semelhantes. As funções de transferência obtidas são mostradas a seguir e as Figuras 4.3a e 4.3b mostram a comparação entre os dados coletados e os modelos aproximados obtidos para a vazão e a temperatura, respectivamente:

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

$$G(s) = \frac{1,30.e^{-2,00.s}}{14,0.s + 1} \quad (4.1)$$

(ii) para a temperatura:  $K = 0,72 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$ ;  $\tau = 378 \text{ s}$ ;  $\theta = 78,0 \text{ s}$

$$G(s) = \frac{0,72.e^{-78,0.s}}{378.s + 1} \quad (4.2)$$

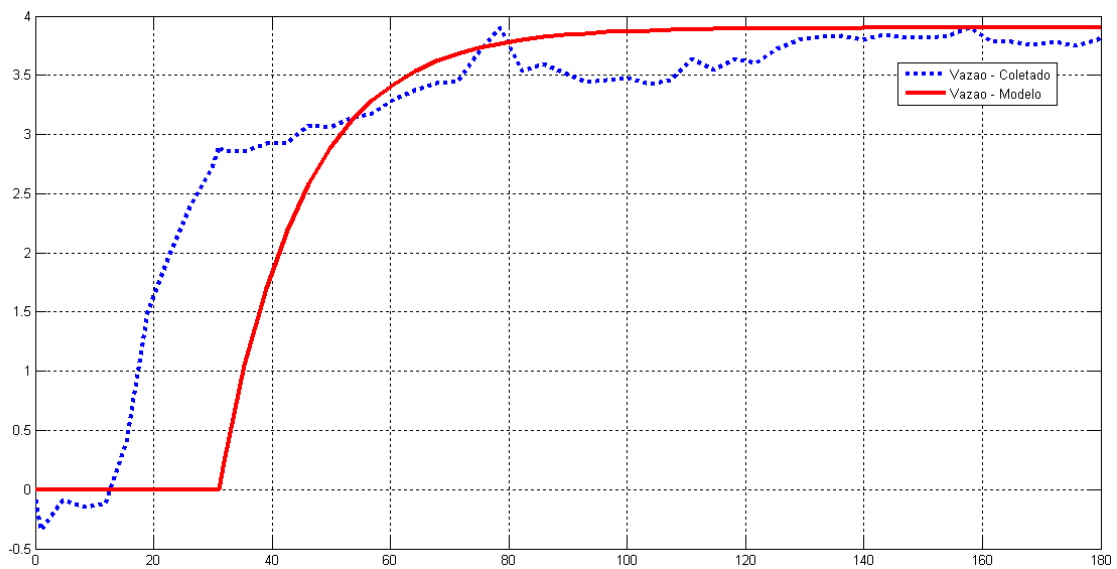


Figura 4.3a – Comparação entre os dados coletados e o modelo aproximado obtido para a vazão



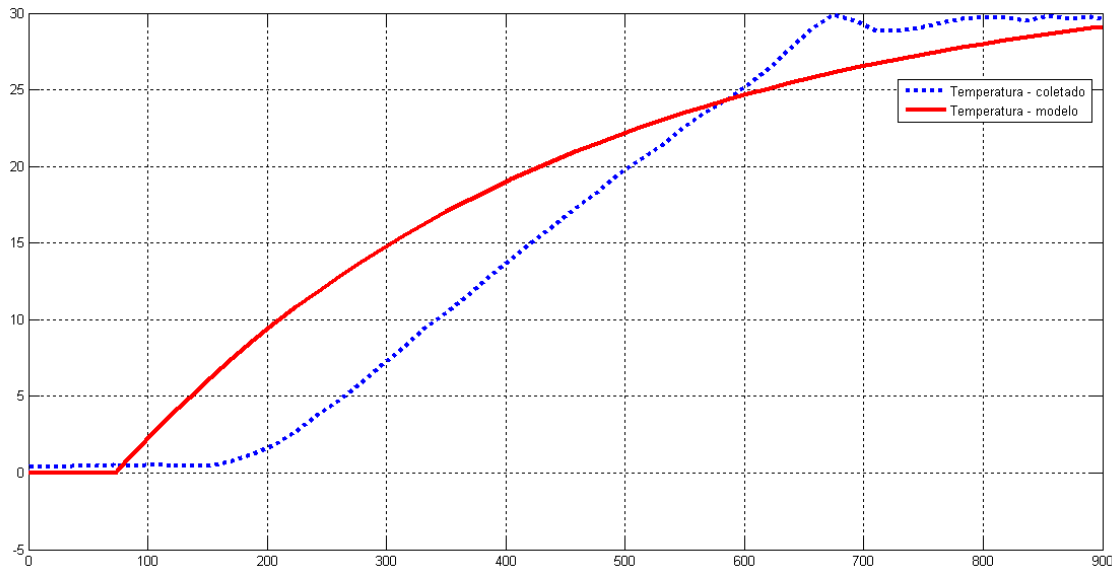


Figura 4.3b – Comparação entre os dados coletados e o modelo aproximado obtido para a temperatura

## 4.2 Sintonias dos controladores de vazão e temperatura

Utilizando os parâmetros do processo obtidos ( $K$ ,  $\tau$  e  $\theta$ ) no item 4.1, 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* e ITAE por *Rovira*.

Os métodos mencionados consistem basicamente em aplicar-se um degrau em malha aberta e, a partir do ganho ( $K$ ) do processo, do atraso de transporte ( $\theta$ ) e do atraso de transferência ( $\tau$ ), obter-se os parâmetros do controlador.

Para o método de Ziegler & Nichols, são obtidos os parâmetros do controlador a partir da tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros de sintonia – Método: Ziegler & Nichols

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\tau/K \times \theta$	–	–
PI	$0.9\tau/K \times \theta$	$3.33 \times \theta$	–
PID	$1.2\tau/K \times \theta$	$2 \times \theta$	$0.5 \times \theta$

No método Chien, Hrones e Reswick (CHR) sem sobrevalor e com 20% de sobrevalor os parâmetros são obtidos a partir das Tabelas 4.2 e 4.3, respectivamente.

Tabela 4.2 – Parâmetros de sintonia – Método: CHR sem sobrevalor

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.3\tau/(K \times \theta)$	–	–
PI	$0.35\tau/(K \times \theta)$	$1.16 \times \tau$	–
PID	$0.6\tau/(K \times \theta)$	$\tau$	$0.5 \times \theta$

Tabela 4.3 – Parâmetros de sintonia – Método: CHR 20% de sobrevalor

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.7\tau/(K \times \theta)$	–	–
PI	$0.6\tau/(K \times \theta)$	$\tau$	–
PID	$0.95\tau/(K \times \theta)$	$1.357\tau$	$0.473 \times \theta$

No método CC - Cohen & Coon os parâmetros são obtidos a partir da Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros de sintonia – Método: Cohen & Coon

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$(1.03 + 0.35 \times (\frac{\theta}{\tau})) \times \frac{\tau}{K \times \theta}$	–	–
PI	$(0.9 + 0.083 \times (\frac{\theta}{\tau})) \times \frac{\tau}{K \times \theta}$	$\frac{(0.9 + 0.083 \times (\frac{\theta}{\tau}))}{(1.27 + 0.6 \times (\frac{\theta}{\tau}))} \times \theta$	–
PI	$(1.35 + 0.25 \times (\frac{\theta}{\tau})) \times \frac{\tau}{K \times \theta}$	$\frac{(1.35 + 0.25 \times (\frac{\theta}{\tau}))}{(0.54 + 0.33 \times (\frac{\theta}{\tau}))} \times \theta$	$\frac{0.5 \times \theta}{(1.35 + 0.25 \times (\frac{\theta}{\tau}))} \times \theta$

Nos métodos ITAE - *Integral do Módulo do Erro vezes o Tempo* por Lopez et al. e ITAE por Rovira et al. os parâmetros são obtidos a partir das Tabelas 4.5a e b e 4.6a e b, respectivamente.

Tabela 4.5a – Parâmetros de sintonia – Método: ITAE-Lopez

Controlador	Critério	A	B	C	D	E	F
PI	ITAE	0.859	-0.977	0.674	-0.68	—	—
PID	ITAE	1.357	-0.947	0.842	-0.738	0.381	0.995

Tabela 4.5b – Parâmetros de sintonia – Método: ITAE-Lopez

$K_p$	$T_i$	$T_d$
$\frac{1}{K} \times \left( A \times \left( \frac{\theta}{\tau} \right)^B \right)$	$\frac{\tau}{\left( C \times \left( \frac{\theta}{\tau} \right)^D \right)}$	$\tau \times \left( E \times \left( \frac{\theta}{\tau} \right)^F \right)$

Tabela 4.6a – Parâmetros de sintonia – Método: ITAE-Rovira

Controlador	Critério	A	B	C	D	E	F
PI	ITAE	0.586	-0.916	1.03	-0.165	—	—
PID	ITAE	0.965	-0.850	0.796	-0.147	0.308	0.929

Tabela 4.6b – Parâmetros de sintonia – Método: ITAE-Rovira

$K_p$	$T_i$	$T_d$
$\frac{1}{K} \times \left( A \times \left( \frac{\theta}{\tau} \right)^B \right)$	$\frac{\tau}{\left( C + D \times \left( \frac{\theta}{\tau} \right) \right)}$	$\tau \times \left( E \times \left( \frac{\theta}{\tau} \right)^F \right)$

Os parâmetros dos controladores (tipo P, PI e PID) calculados para vazão e para temperatura são apresentados na tabela 4.7, onde:  $K_p$  é o ganho proporcional,  $T_i$  a constante de tempo integral e  $T_d$  a constante de tempo derivativa.

Tabela 4.7 – Parâmetros teóricos para sintonia dos controladores.

**CONSTANTES DE ENTRADA: Parâmetros de processo**

Parâmetros de processo		Vazão	Temper.
Ganho do processo	K	1,30	0,72
Constante de tempo	$\tau$	14,0	378
Tempo morto	$\theta$	2,00	78,0

**Cálculos dos parâmetros de sintonia para o controle de vazão**

	Kp	TI	TD
<b>Método: Ziegler &amp; Nichols</b>			
P	5,385	---	---
PI	4,846	0,111	---
PID	6,462	0,067	0,017

<b>Método: CHR - Critério 20% de sobrevalor</b>			
P	3,769	---	---
PI	3,231	0,233	---
PID	5,115	0,321	0,016

<b>Método: ITAE - Lopez</b>			
PI	0,799	0,092	---
PID	6,591	0,066	0,013

	Kp	TI	TD
<b>Método: Cohen e Coon</b>			
P	5,815	---	---
PI	4,910	0,022	---
PID	7,462	0,079	0,012

<b>Método: CHR - critério sem sobrevalor</b>			
P	1,615	---	---
PI	3,231	0,133	---
PID	5,115	0,079	0,014

<b>Método: ITAE - Rovira</b>			
PI	2,680	0,164	---
PID	3,881	0,220	0,012

**Cálculos dos parâmetros de sintonia para o controle de temperatura**

	Kp	TI	TD
<b>Método: Ziegler e Nichols</b>			
P	6,731	---	---
PI	6,058	4,329	---
PID	8,077	2,600	0,650

<b>Método: CHR - Critério 20% de sobrevalor</b>			
P	4,712	---	---
PI	4,038	6,300	---
PID	6,394	8,663	0,615

<b>Método: ITAE - Lopez</b>			
PI	1,392	3,196	---
PID	8,401	2,335	0,499

	Kp	TI	TD
<b>Método: Cohen e Coon</b>			
P	7,419	---	---
PI	6,173	0,855	---
PID	9,434	2,996	0,464

<b>Método: CHR - critério sem sobrevalor</b>			
P	2,019	---	---
PI	4,038	5,200	---
PID	6,394	3,088	0,547

<b>Método: ITAE - Rovira</b>			
PI	3,455	4,714	---
PID	5,126	6,276	0,448

A partir dos parâmetros de sintonia dos controladores calculados, foram realizadas simulações de controladores do tipo P e PI para vazão e do tipo P, PI e PID para a temperatura, com o aplicativo SIMULINK em ambiente MATLAB®, com o propósito de análise dos parâmetros de sintonia calculados dentre os métodos citados, para a escolha daqueles a serem testados nos controladores. Dentre os parâmetros de sintonia, serão escolhidos aqueles que apresentarem a resposta menos agressiva ao processo, e estes variados gradativamente até obter-se uma sintonia adequada ao processo.

As Figuras 4.4a e 4.4b ilustram as telas utilizadas nas simulações em ambiente MATLAB® para os parâmetros calculados para o controle proporcional (vazão e temperatura, respectivamente).

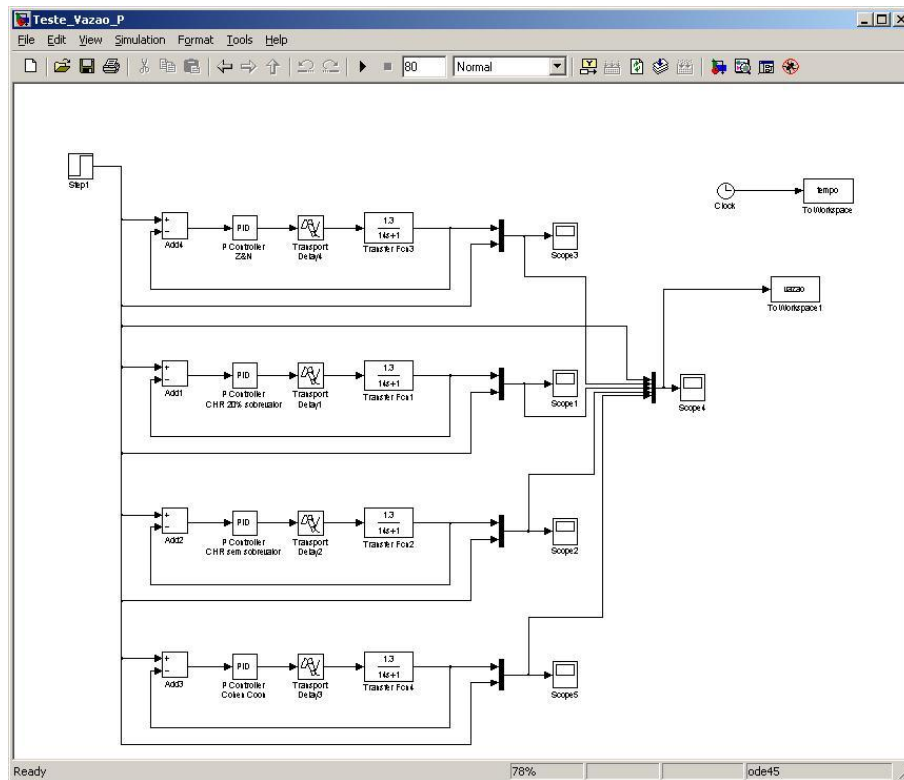


Figura 4.4a – Blocos do Simulink/MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores proporcionais de vazão

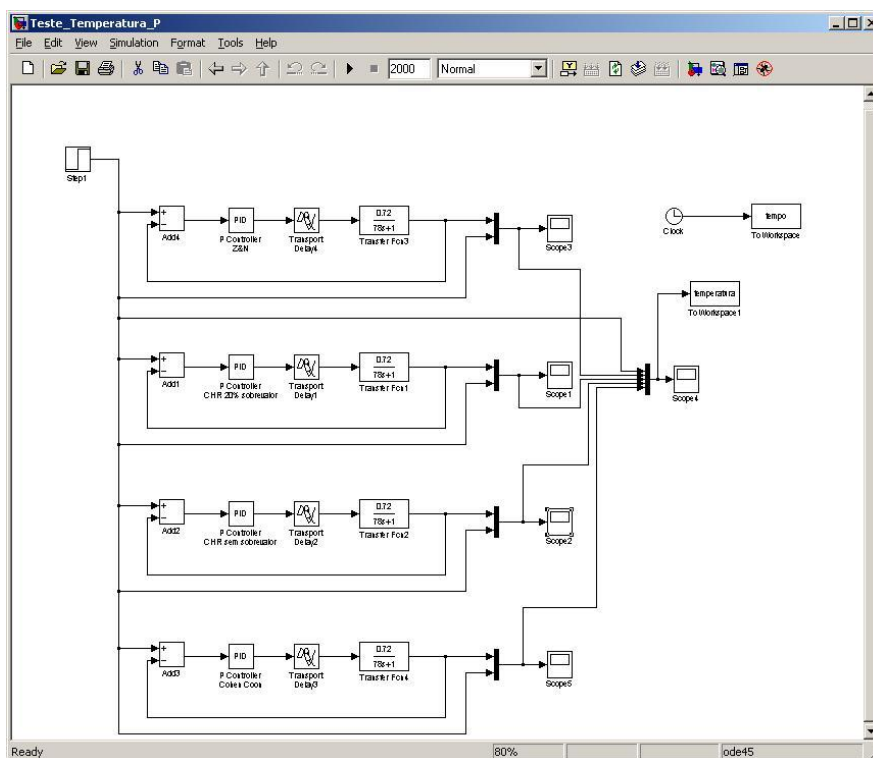


Figura 4.4b - Blocos do Simulink/MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores proporcionais de temperatura

As figuras 4.5a e 4.5b ilustram os resultados das simulações da resposta ao degrau para a vazão e a temperatura, respectivamente. Observa-se presente, em ambas as simulações, erro em estado estacionário, o que demonstra a ineficiência do controlador puramente proporcional para ambos os casos.

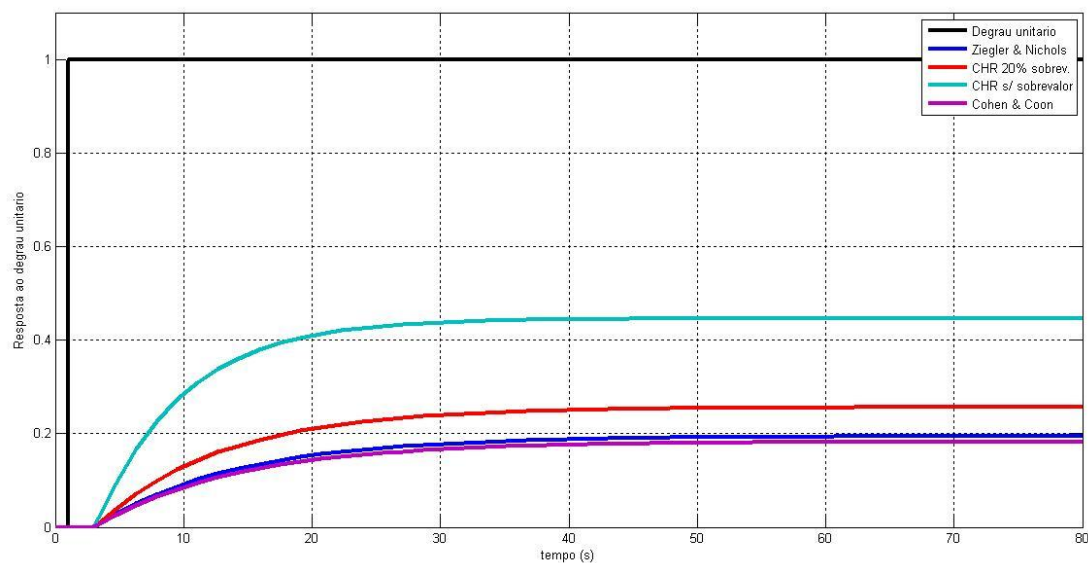


Figura 4.5a - Comportamento temporal (simulação) dos controladores proporcionais de vazão perturbadas por um degrau unitário.

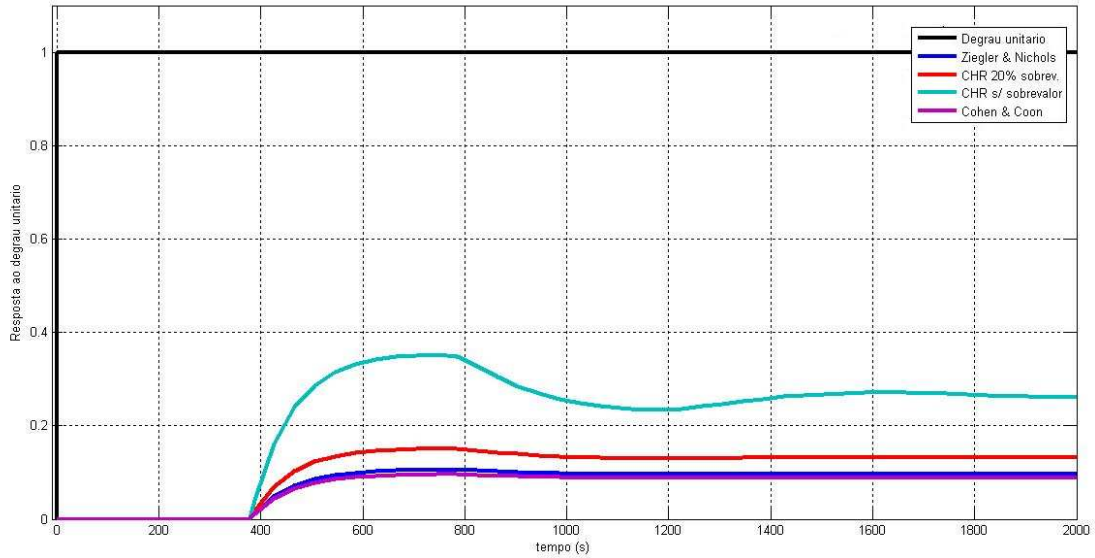


Figura 4.5b - Comportamento temporal (simulação) dos controladores proporcionais de temperatura perturbadas por um degrau unitário.

Na sequência, foram realizadas simulações dos controladores PI.

As Figuras 4.6a e 4.6b ilustram as telas utilizadas nas simulações em ambiente MATLAB® para os parâmetros calculados para o controle PI (vazão e temperatura, respectivamente).

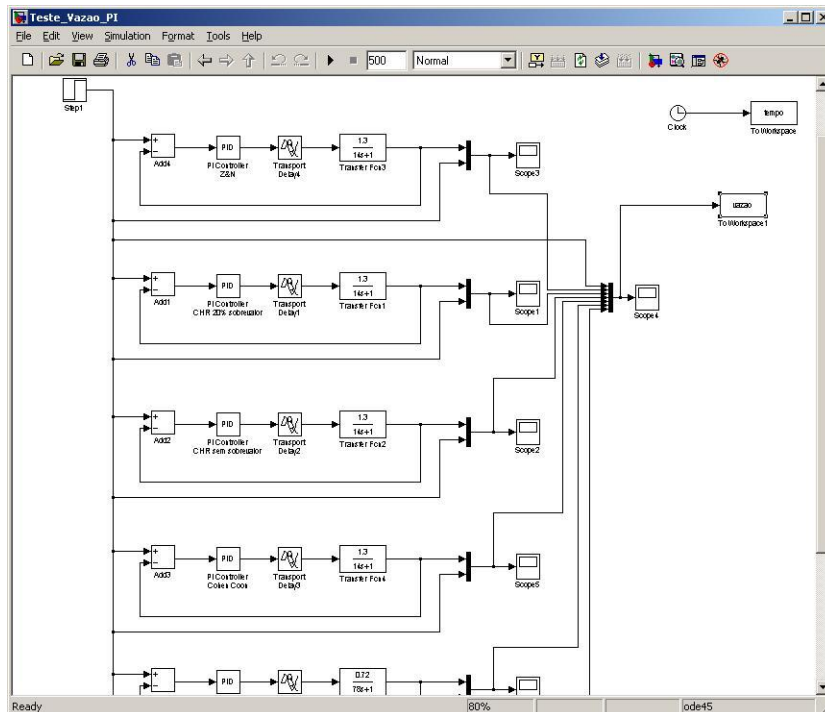


Figura 4.6a - Blocos do Simulink/MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores PI de vazão

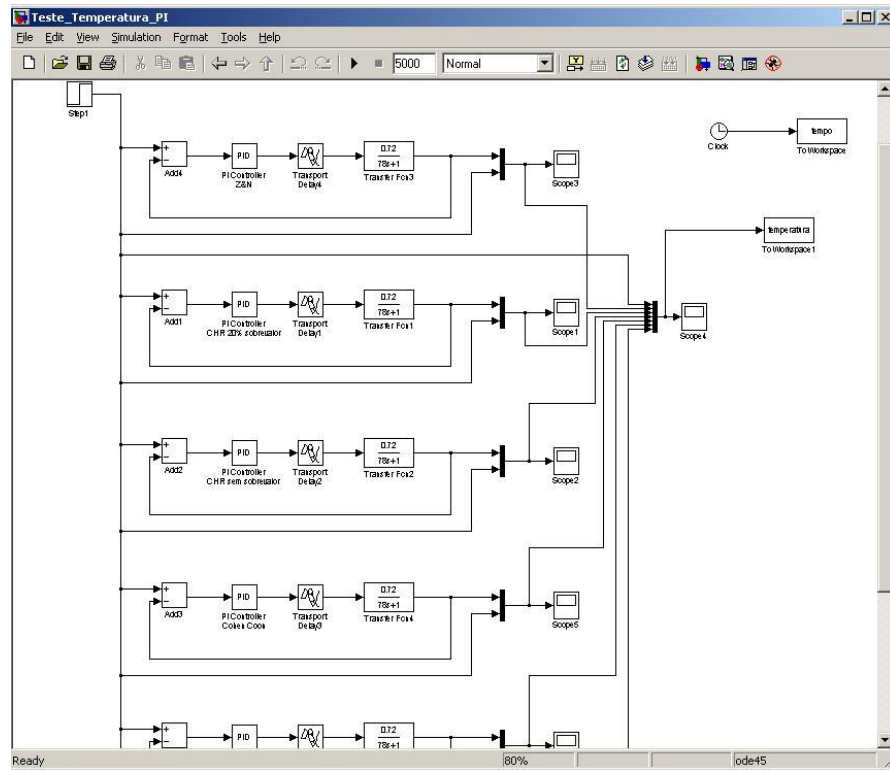


Figura 4.6b - Blocos do Simulink/MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores PI de temperatura

As figuras 4.7a e 4.7b ilustram os resultados das simulações da resposta ao degrau para a vazão e a temperatura, respectivamente.

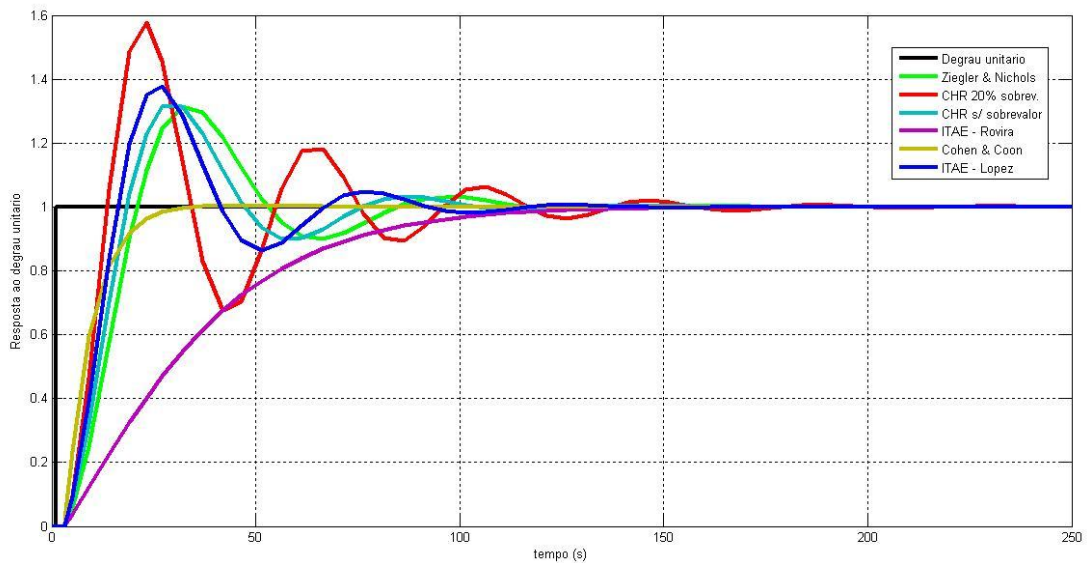


Figura 4.7a - Comportamento temporal (simulação) dos controladores PI de vazão perturbadas por um degrau unitário.



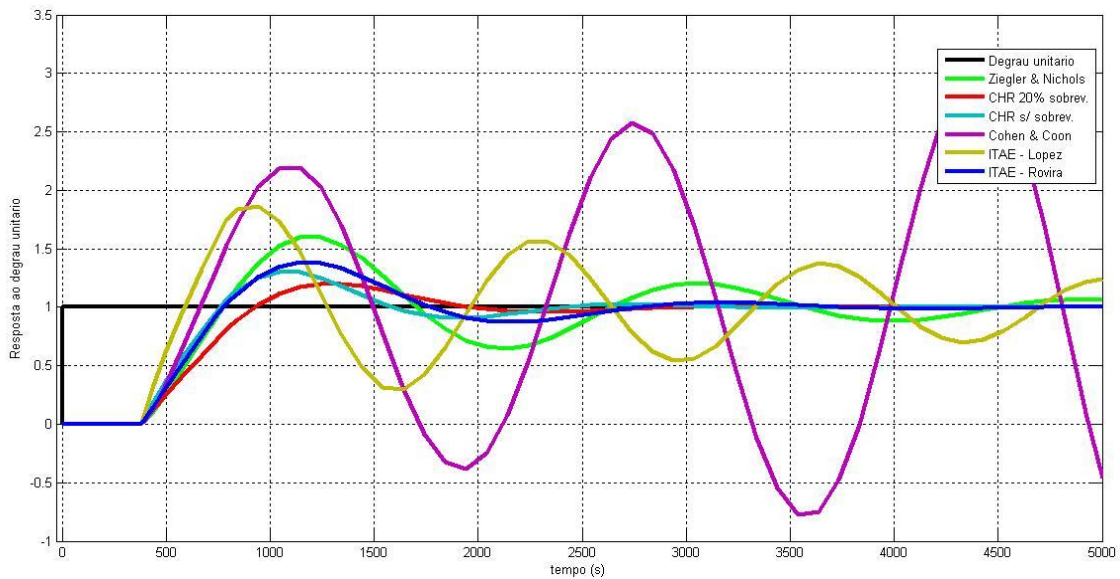


Figura 4.7b - Comportamento temporal (simulação) dos controladores PI de temperatura perturbadas por um degrau unitário

Para o controle de vazão, observa-se que o método ITAE por Rovira (parâmetros  $K_p = 2,68$ ;  $T_i = 0,164$  s), apresenta os parâmetros de sintonia cujo controle, na simulação, é o menos agressivo, optando-se por escolher partir destes parâmetros, ajustando os mesmos até obter-se uma sintonia adequada. Sendo assim, não houve necessidade de realizar a simulação para os parâmetros de sintonia PID calculados para o controle de vazão, sendo o controle PI eficiente para a sintonia.

Já para o controle de temperatura, optou-se por realizá-la, para verificação da possibilidade de parâmetros de sintonia para um controle menos agressivo. Foram então realizadas simulações dos controladores PID para o controle de temperatura.

A Figura 4.8 ilustra a tela utilizada na simulação em ambiente MATLAB® dos parâmetros de sintonia PID calculados para o controle de temperatura.

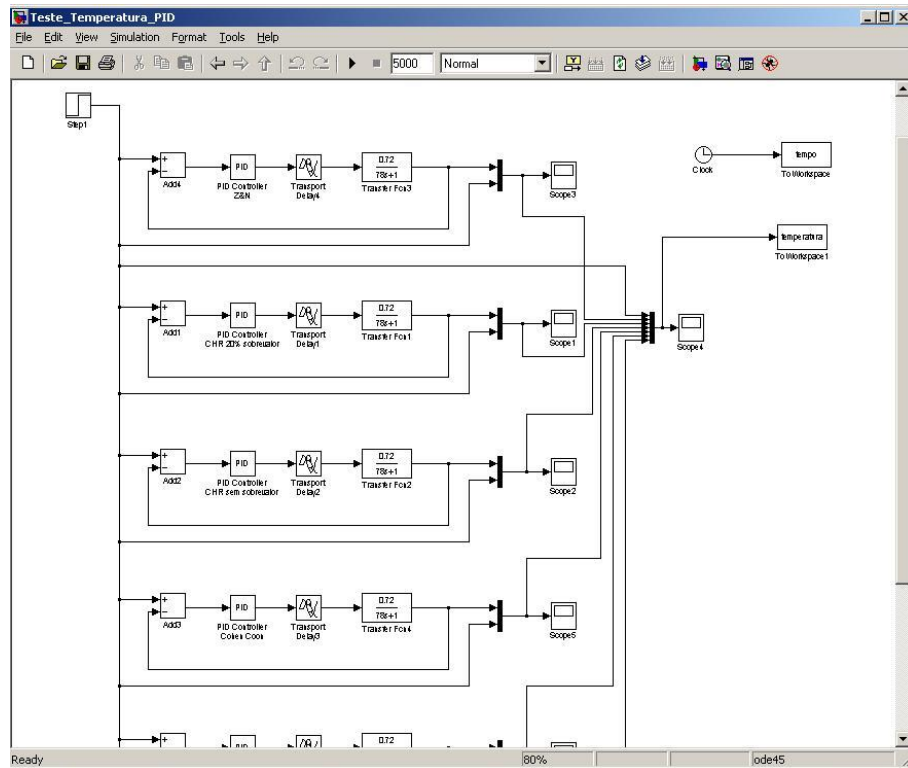


Figura 4.8 - Blocos do Simulink/MATLAB® para simulação do comportamento dos controladores PID de temperatura

A figura 4.9 ilustra os resultados da simulação da resposta ao degrau para a temperatura.

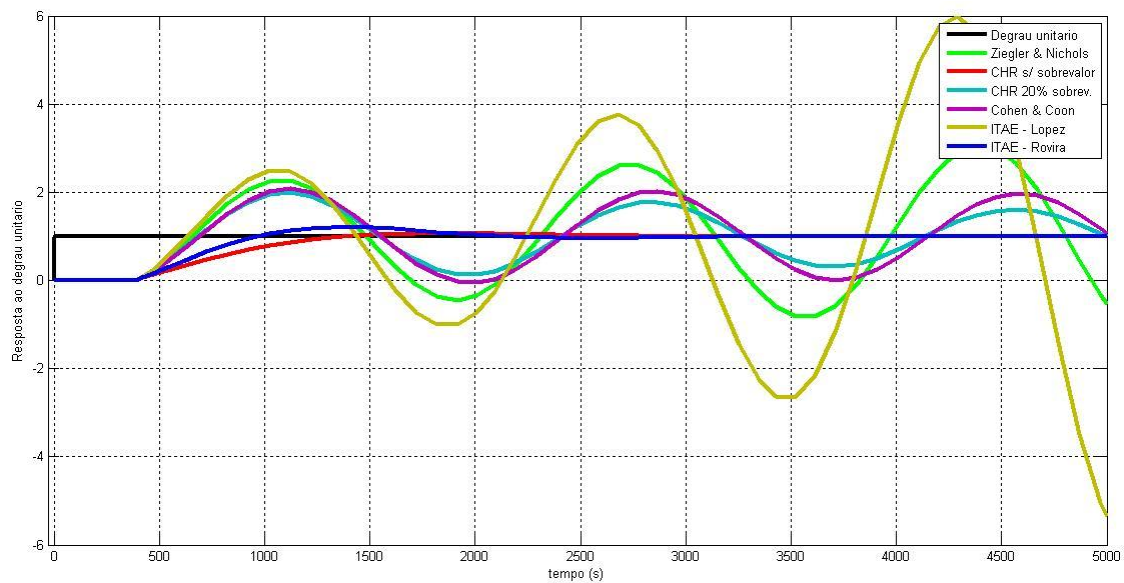


Figura 4.9 - Comportamento temporal (simulação) dos controladores PID de temperatura perturbadas por um degrau unitário

Para o controle de temperatura, observa-se que o método CHR sem sobrevalor (parâmetros  $K_p = 6,394$ ;  $T_i = 3,088$  s e  $T_d=0,547$  s), apresenta os parâmetros de sintonia cujo controle, na simulação, é o menos agressivo, optando-se por escolher partir destes parâmetros, ajustando os mesmos até obter-se uma sintonia adequada.

Foram feitos então ensaios no trocador de calor, utilizando os controladores desenvolvidos na plataforma LabVIEW®. Os ganhos utilizados nos controladores de vazão e temperatura foram inicialmente os obtidos com os resultados dos modelos simulados detalhados neste item. Todos os ensaios foram realizados com uma taxa de amostragem de 1 segundo.

#### 4.2.1 Sintonia do controlador da vazão do fluido de processo

Conforme citado no item 4.2, para o ensaio da vazão, o melhor resultado obtido foi utilizando controlador PI com os parâmetros de sintonia calculados pelo método *ITAE* por Rovira (parâmetros  $K_p = 2,68$ ;  $T_i = 0,164$  s). Após testes realizados na planta partindo dos parâmetros de sintonia calculados observou-se que a vazão apresentou um pequeno *off-set* em relação ao *set-point*, sendo o tempo integral reduzido com o objetivo de aumentar a taxa de repetição da ação sobre o erro; os valores finais que apresentaram o melhor resultado e foram utilizados na planta foram:  $K_p= 2,68$  e  $T_i= 0,101$  s.

O comportamento apresentado na Figura 4.10a é o da variável desvio da PV – diferença entre a PV e a PV em regime permanente (considerada  $10 \text{ L.min}^{-1}$ ) e a Figura 4.10b apresenta o comportamento da MV (sinal enviado ao inversor de frequência).

Iniciou-se o ensaio em  $t= 0$  s com vazão de  $10 \text{ L.min}^{-1}$ , entrada com água fria. Na amostragem 550 s aplicou-se degrau positivo de uma unidade no *set-point* (para  $11 \text{ L.min}^{-1}$ ). Na amostragem 720 s aplicou-se degrau negativo de uma unidade (para  $10 \text{ L.min}^{-1}$ ). Nota-se, pela figura, que o controlador proposto forneceu uma dinâmica da vazão do fluido de processo (PV) considerada adequada para esta aplicação, entrando rapidamente em regime em torno *set-point* definido. Ressalta-se também que a ação da bomba (MV) é bastante estável, sendo que a mesma trabalha em torno de um valor (ideal na prática, pois acarreta menor desgaste da bomba), variando mais dinamicamente e por um período reduzido somente no instante de variação no *set-point*.

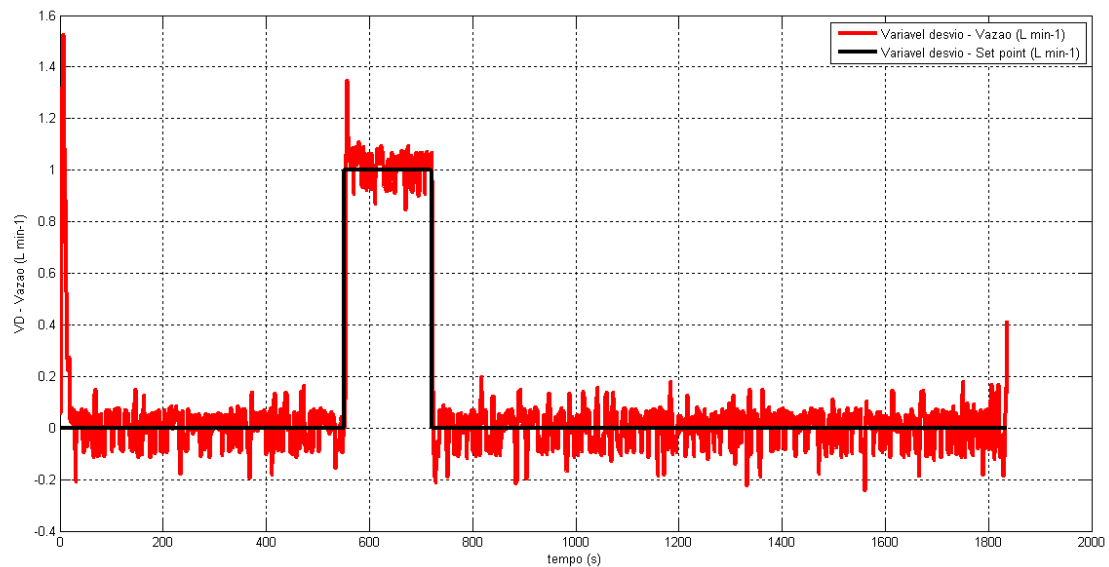


Figura 4.10a - Variável desvio - vazão PV (Variação do set-point de  $10 \text{ L.min}^{-1}$  para  $11 \text{ L.min}^{-1}$ )

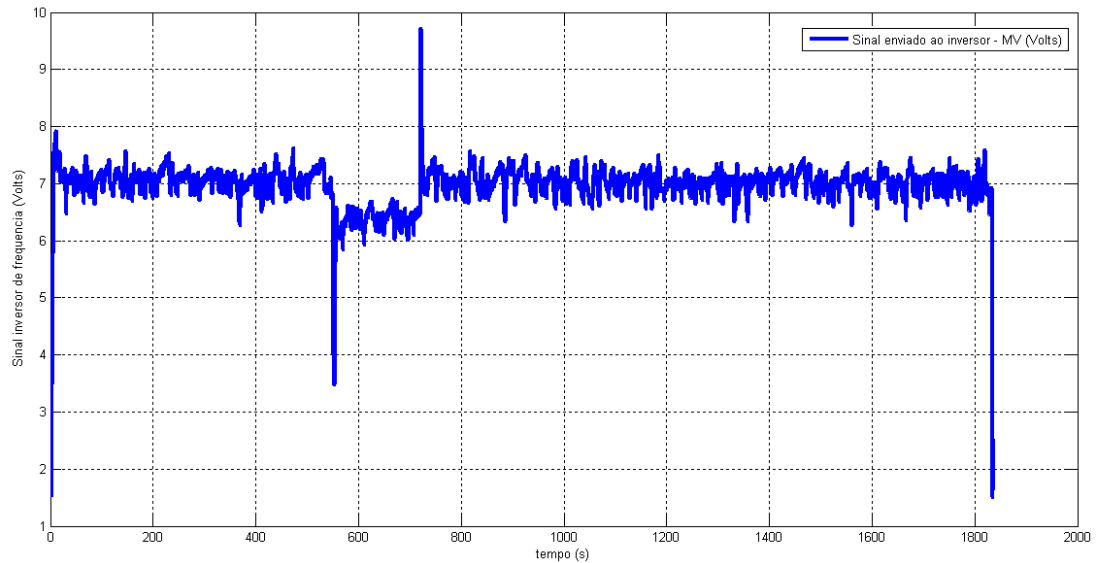


Figura 4.10b - Sinal enviado a inversor de frequência (MV) à variações no set-point de vazão

#### 4.2.2 Sintonia do controlador da temperatura de saída do fluido de processo

Inicialmente o controlador de temperatura da saída do fluido de processo (T1) foi implementado no LabVIEW<sup>®</sup> utilizando o controlador PID com os parâmetros de sintonia calculados pelo método CHR sem sobrevalor (parâmetros  $K_p = 6,394$ ;  $T_i = 3,088$  s e  $T_d = 0,547$  s).

Durante os testes, tinha-se conhecimento da diferença da dinâmica para o aumento e para a redução da temperatura. Isto se deve ao fato já citado de que, para o aumento da temperatura simplesmente “atua-se” na abertura da válvula de vapor injetando mais vapor de água saturado ao fluido de aquecimento do casco do trocador de calor, o qual aquece o fluido de processo que passa pelos tubos; porém o mesmo não ocorre para o resfriamento que, devido às limitações físicas, se dá simplesmente por troca térmica com o ambiente apresentando assim um maior tempo de resposta quando comparado ao aquecimento.

Foram então realizados testes na planta partindo dos parâmetros de sintonia calculados e observou-se que a temperatura apresentou um pequeno *off-set* em relação ao *set-point*, sendo o tempo integral reduzido com o objetivo de aumentar a taxa de repetição da ação sobre o erro. Após a eliminação do *off-set*, notou-se ainda uma pequena oscilação na temperatura, o que poderia ser melhorado com um aumento do tempo derivativo, tomando-se o cuidado de não instabilizar a temperatura ; os valores finais que apresentaram o melhor resultado e foram utilizados na planta foram:  $K_p = 6,394$ ;  $T_i = 3,640$  s e  $T_d=0,621$  s.

Porém, devido às limitações citadas, o controle para redução da temperatura não se apresentou adequado. Após testes, observou-se que o tempo integral para eliminação do *off-set* e o tempo derivativo para antecipação do erro levavam, na prática, à uma ação na abertura da válvula de vapor, tendo uma ação contrária ao resfriamento; logo um controle puramente proporcional com um ganho baixo foi o que atuou de maneira mais estável no resfriamento da temperatura; o valor final que apresentou o melhor resultado e foi utilizado na planta foi:  $K_p = 0,08$ .

Logo se optou pela implementação de um controlador em que, no aumento da temperatura eram utilizados os parâmetros PID  $K_p = 6,394$ ;  $T_i = 3,640$  s e  $T_d=0,621$  s, e para a diminuição da temperatura, foi utilizado o controlador proporcional com o parâmetro  $K_p = 0,08$ .

A Figura 4.11a ilustra a resposta da temperatura (T1) medida em função da variação do *set-point* de temperatura e a Figura 4.11b ilustra o comportamento da MV (sinal enviado à válvula de vapor). O ensaio foi realizado com água em vazão constante de  $9 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  e temperatura inicial da saída do fluído de processo estabilizada em aproximadamente  $48^\circ\text{C}$ . Foram realizadas as seguintes variações no *set-point* da temperatura:

- i) Na amostragem 185 s aplicou-se degrau positivo de 5 unidades no *set-point* (para  $53^\circ\text{C}$ );
- ii) Na amostragem 460 s aplicou-se degrau positivo de 4 unidades no *set-point* (para  $57^\circ\text{C}$ );

- iii) Na amostragem 648 s aplicou-se degrau positivo de 7 unidades no *set-point* (para 64 °C);
- iv) Na amostragem 860 s aplicou-se degrau positivo de 6 unidades no *set-point* (para 70 °C);
- v) Na amostragem 1260 s aplicou-se degrau negativo de 5 unidades no *set-point* (para 65 °C);
- vi) Na amostragem 1530 s aplicou-se degrau negativo de 5 unidades no *set-point* (para 60 °C);
- vii) E finalmente, na amostragem 1720 s aplicou-se degrau negativo de 10 unidades no *set-point* (para 50 °C).

O controlador proposto forneceu uma dinâmica da temperatura (PV) adequada para esta aplicação, tendo em vista os altos valores das constantes de tempo envolvidas nos processos de aquecimento e resfriamento. Ressalta-se também que a oscilação da válvula (MV) é maior (desconsiderando o ruído que os dados apresentam) quando comparada ao controlador de vazão, devido à maior dificuldade de controle da variável temperatura. Isto não chega a ser considerado crítico à válvula, pois observa-se uma variação suave do atuador da válvula (apesar de um deslocamento grande), provando que há ruídos nos dados coletados e que o controle é satisfatório para a temperatura, sem afetar a integridade da válvula proporcional de vapor.

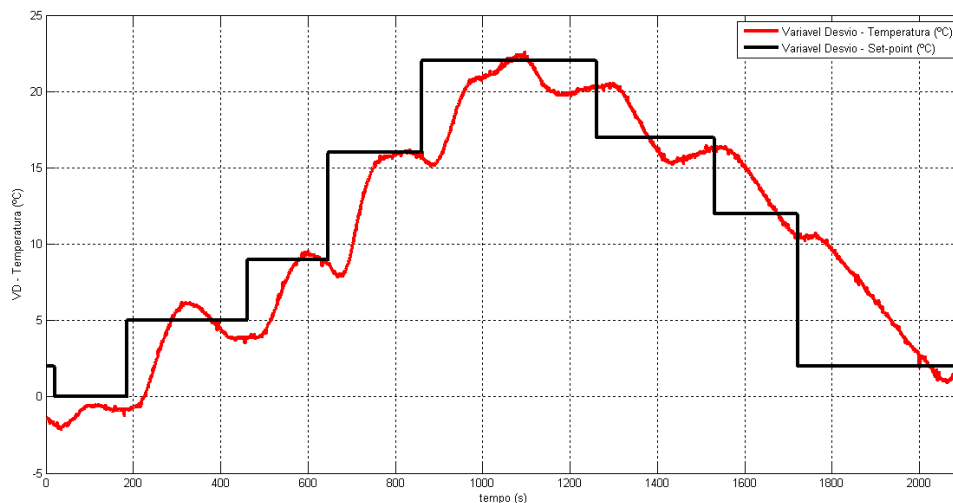


Figura 4.11a - Variável desvio - temperatura PV (Variação do set-point de 50°C para 70 °C)

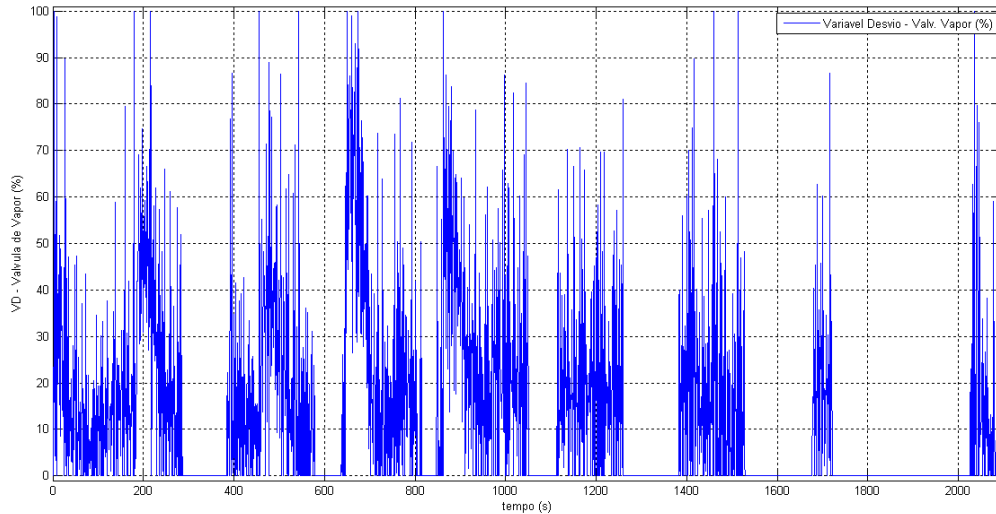


Figura 4.11b - Sinal enviado à válvula proporcional de vapor (MV) à variações no set-point de temperatura

### 4.3 Modelagem matemática do comportamento do pH em função do tempo

Os dados experimentais coletados da variação do pH no tempo apresentaram uma oscilação excessiva, sendo que interesse neste estudo é a representação da dinâmica da resposta do pH. Melero (2011) utiliza o algoritmo Wavelet, disponibilizado no aplicativo MATLAB®, para a filtragem de ruídos. Aplicando-se em uma amostra de dados coletados, pode-se observar claramente na figura 4.12 que o algoritmo apresenta um bom desempenho de filtragem para o estudo em questão (esta filtragem será aplicada para todos os dados coletados que serão apresentados nos itens subsequentes relacionados à coleta do pH).



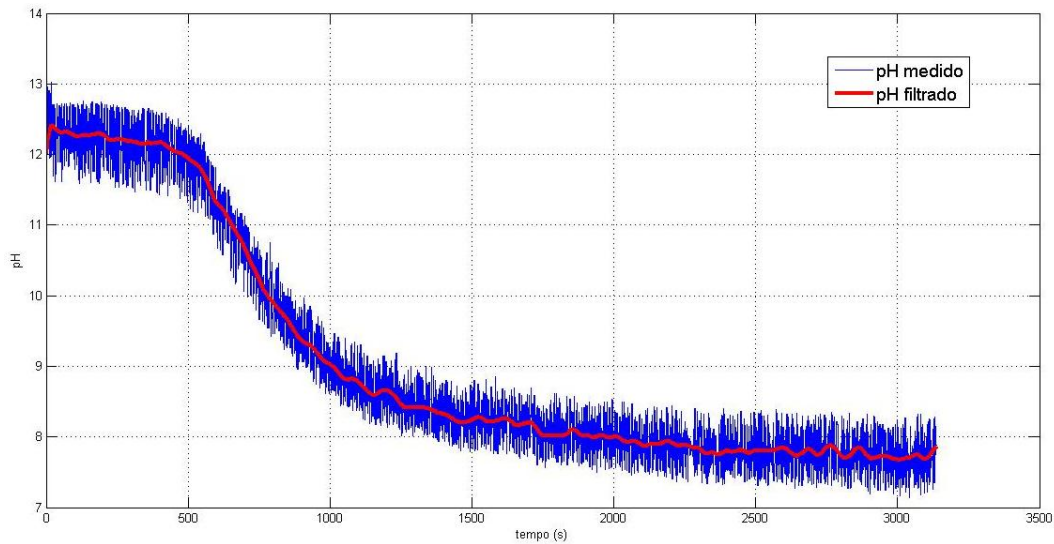


Figura 4.12 – pH medido x pH após filtragem de sinal para vazão de  $9 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

Fica claro que esta filtragem tem o aspecto positivo de manter a representação da dinâmica de resposta do pH no tempo (que é de interesse neste estudo) e remover a oscilação que se deve ao fato dos ruídos inseridos devido à instrumentação utilizada para a coleta dos dados.

Com base nos dados coletados, foi realizada a modelagem aproximada de 1ª ordem com atraso de transporte. Os modelos obtidos foram comparados com os dados coletados experimentalmente no software SIMULINK/MATLAB®.

#### 4.3.1 *Comportamento do pH em função da variação da temperatura*

Baseando-se no procedimento citado no item 3.2.3.4, foram aplicadas perturbações do tipo degrau na temperatura na etapa de enxágue, mantendo-se a vazão do fluido de processo constante em  $9 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . No ensaio inicial a temperatura foi mantida em  $50^\circ\text{C}$ , observando-se o comportamento do pH; em seguida foram aplicados degraus de  $50^\circ\text{C}$  para  $60^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  e  $80^\circ\text{C}$ , obtendo-se as respostas apresentadas na figura 4.13.

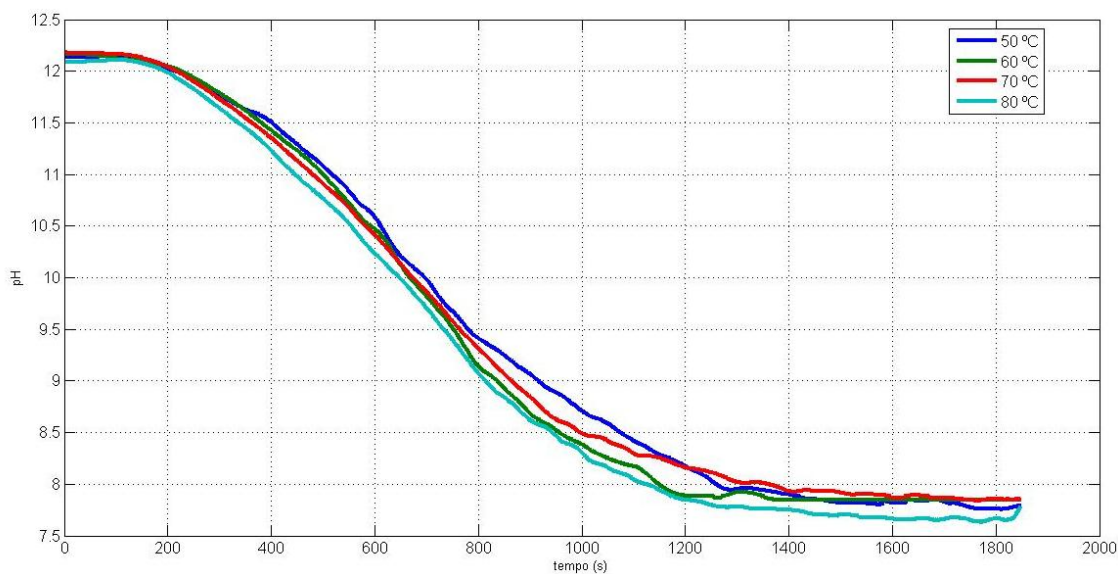


Figura 4.13 – Comportamento do pH em função de variações da temperatura

Observa-se claramente que o tempo de limpeza na etapa de enxágue (a limpeza foi considerada quando o pH atinge um valor próximo à neutralidade e em regime estacionário) não é influenciado significativamente às variações da temperatura (na faixa de temperaturas permitida pela instrumentação disponível na bancada).

Por não apresentar um ganho significativo no estudo em questão, não foi realizada a modelagem do comportamento do pH em função de variações da temperatura.

#### 4.3.2 Comportamento do pH em função da variação da vazão

Baseando-se no procedimento citado no item 3.2.3.5, na sequência foram aplicadas perturbações do tipo degrau na vazão na etapa de enxágue, mantendo-se a temperatura do fluido de processo constante em 50°C. Neste ensaio foram aplicados degraus de 0 L.min<sup>-1</sup> para 4 L.min<sup>-1</sup>, 6 L.min<sup>-1</sup>, 7,5 L.min<sup>-1</sup>, 9 L.min<sup>-1</sup>, 10,5 L.min<sup>-1</sup>, 12 L.min<sup>-1</sup>, 14 L.min<sup>-1</sup> e 16 L.min<sup>-1</sup>, obtendo-se as respostas apresentadas na figura 4.14.

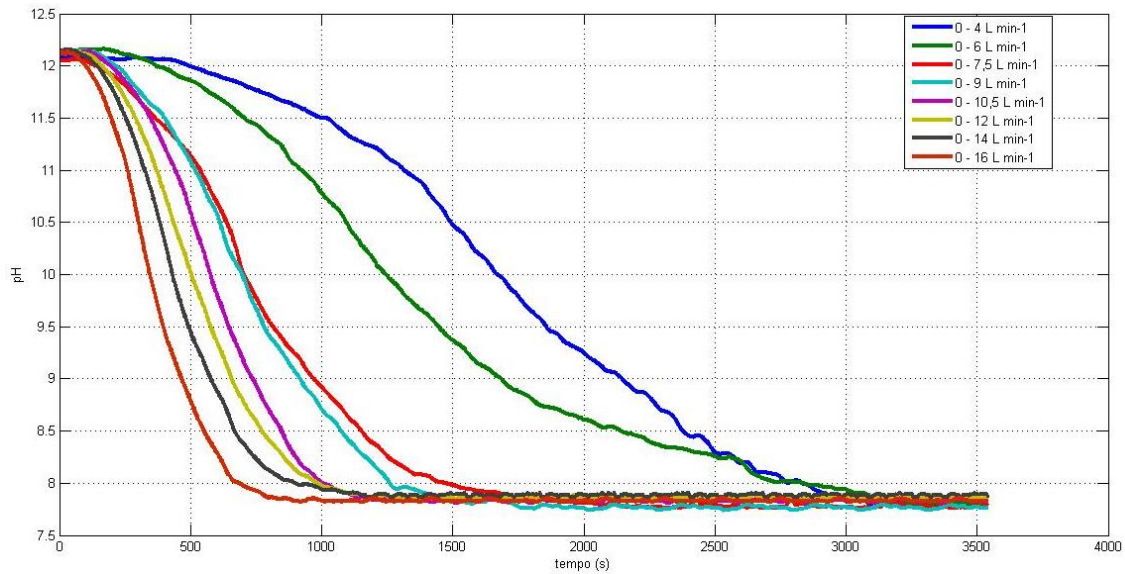


Figura 4.14 – Comportamento do pH em função de variações da vazão

Para que se tenha uma limpeza efetiva, a limpeza será mais efetiva com valores de vazão em que o sistema esteja operando em regime turbulento. Logo foi calculado o número de Reynolds para as vazões utilizadas nos ensaios. Para a vazão de  $4 \text{ L.min}^{-1}$ , o número de Reynolds é 1964,4 (regime laminar), 2593,4 (regime turbulento) para a vazão  $6 \text{ L.min}^{-1}$ , 3065,2 (regime turbulento) para a vazão  $7,5 \text{ L.min}^{-1}$ , 3537 (regime turbulento) para a vazão  $9 \text{ L.min}^{-1}$ , 4008,8 (regime turbulento) para a vazão  $10,5 \text{ L.min}^{-1}$ , 4480,6 (regime turbulento) para a vazão  $12 \text{ L.min}^{-1}$ , 5109,6 (regime turbulento) para a vazão  $14 \text{ L.min}^{-1}$  e 5738,6 (regime turbulento) para a vazão  $16 \text{ L.min}^{-1}$ . Ou seja, por estar operando em regime laminar na vazão  $4 \text{ L.min}^{-1}$ , não há contribuição na eficácia do processo de limpeza, havendo consumo desnecessário de água nesta vazão de operação.

Observa-se que o tempo de enxágue (quando o pH atinge a estabilidade em torno de seu valor neutro – aproximadamente 7,8 para a água utilizada) reduz com o aumento da vazão, porém não de forma linear. Definindo-se o pH igual a 8 como referência, calculou-se o volume de água gasto para se atingir este valor de pH para cada uma das vazões utilizadas. Por exemplo, para a vazão de  $4 \text{ L.min}^{-1}$ , o tempo foi de 47,62 minutos, logo o volume de água gasto foi de 190,5 L; da mesma maneira foi calculado o tempo para as demais vazões, sendo os mesmos: 285,7 L para a vazão 6

L.min<sup>-1</sup>, 187,5 L para as vazões 7,5 e 9 L.min<sup>-1</sup>, 178,5 L para a vazão 10,5 L.min<sup>-1</sup>, 195,2 L para a vazão 12 L.min<sup>-1</sup>, 210 L para a vazão 14 L.min<sup>-1</sup> e 177,7 L para a vazão 16 L.min<sup>-1</sup>. Ou seja, há um menor consumo de água para a vazão de 16 L.min<sup>-1</sup>.

#### 4.3.2.1 *Modelagem matemática do comportamento do pH em função da variação da vazão*

Foi realizada a modelagem do comportamento do pH (mantendo-se a temperatura de operação do trocador de calor constante no valor 50 °C) em função de variações da vazão para 3 vazões de interesse, a saber: valor mínimo (4 L.min<sup>-1</sup>), intermediário (7,5 L.min<sup>-1</sup>) e máximo (12 L.min<sup>-1</sup>); o objetivo é a comparação entre a modelagem aproximada de 1<sup>a</sup> ordem com atraso de transporte utilizando os métodos de Smith e Miller e a modelagem Neuro-*Fuzzy*, através do sistema de inferência proposto por Takagi-Sugeno.

##### 4.3.2.1.1 **Modelagem aproximada – Métodos de Smith e Miller**

A partir dos valores obtidos nos experimentos, foram construídos gráficos que ilustram o comportamento temporal dos valores de pH coletado e modelado correspondentes às concentrações de NaOH presentes na água de enxágue efluente da saída do trocador de calor estudado. Para tal, foi realizada a simulação (apresentadas nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17) no aplicativo Simulink/MATLAB®, sendo assim possibilitada a comparação dos dados experimentais (inseridos em uma *Lookup Table*) com o modelo aproximado obtido e o erro entre modelo e os dados coletados para valores de vazão de 4 L.min<sup>-1</sup> (figura 4.18), 7,5 L.min<sup>-1</sup> (figura 4.19), e 12 L.min<sup>-1</sup> (figura 4.20).

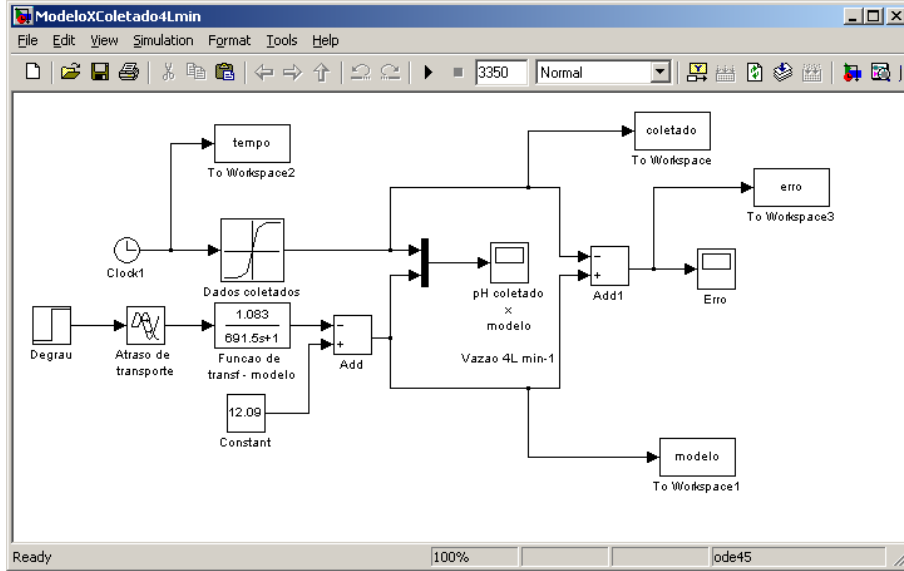


Figura 4.15 – Programa MATLAB® para comparação entre os valores de pH coletado e modelado da água de enxague para degrau na vazão de 0 para 4 L.min<sup>-1</sup>

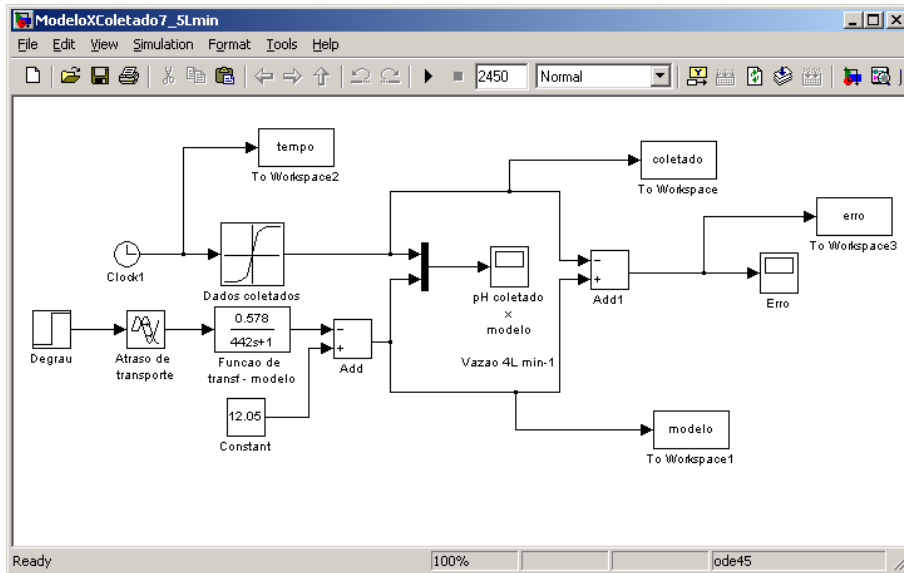


Figura 4.16 – Programa MATLAB® para comparação entre os valores de pH coletado e modelado da água de enxague para degrau na vazão de 0 para 7,5 L.min<sup>-1</sup>

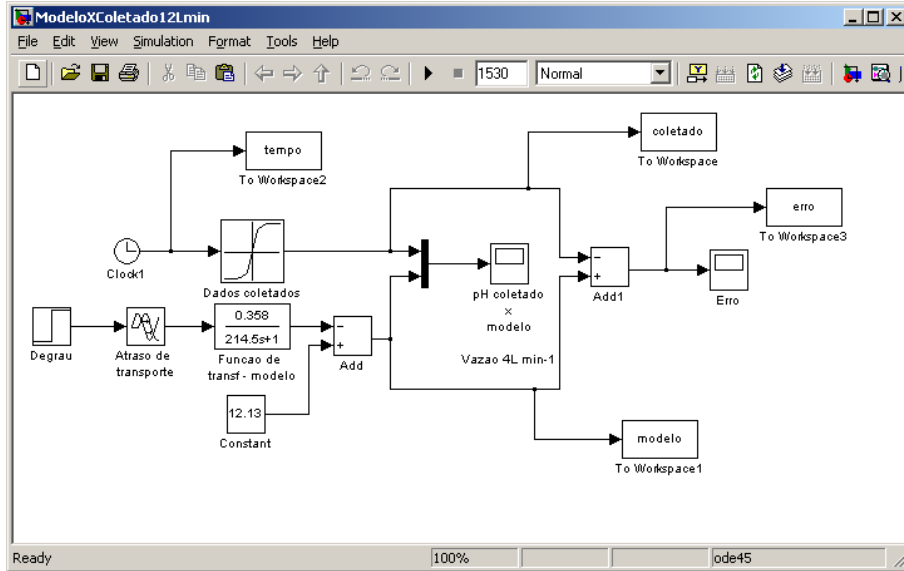


Figura 4.17 – Programa MATLAB® para comparação entre os valores de pH coletado e modelado da água de enxague para degrau na vazão de 0 para 12 L.min<sup>-1</sup>

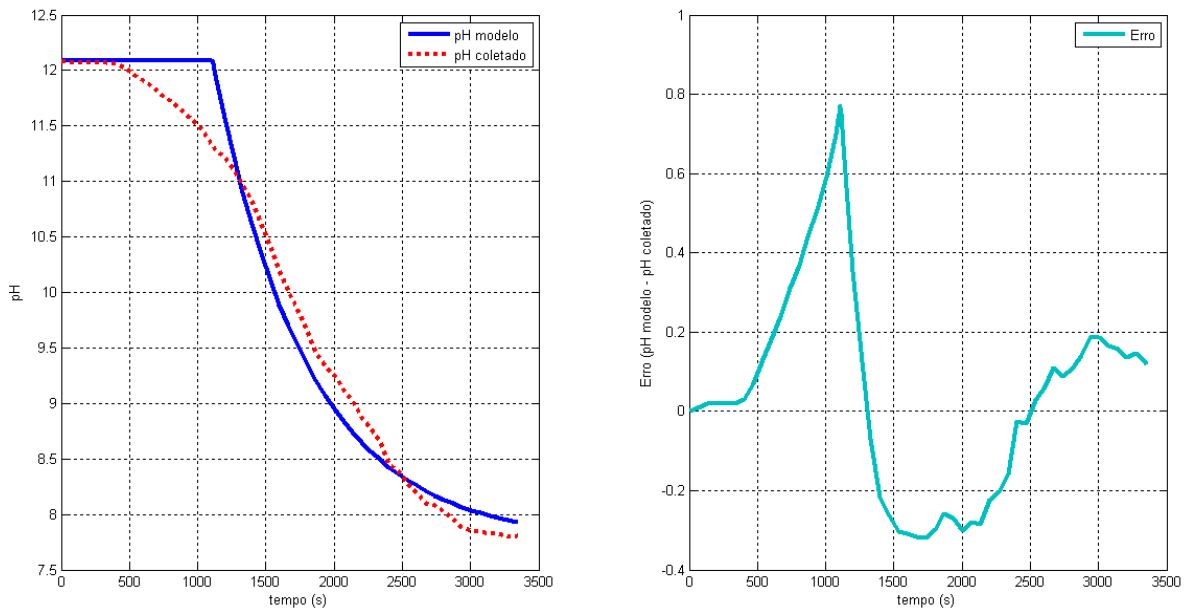


Figura 4.18 – Comportamento do pH coletado x modelado e o erro (pH modelo – pH coletado) para degrau na vazão de 0 para 4 L.min<sup>-1</sup>

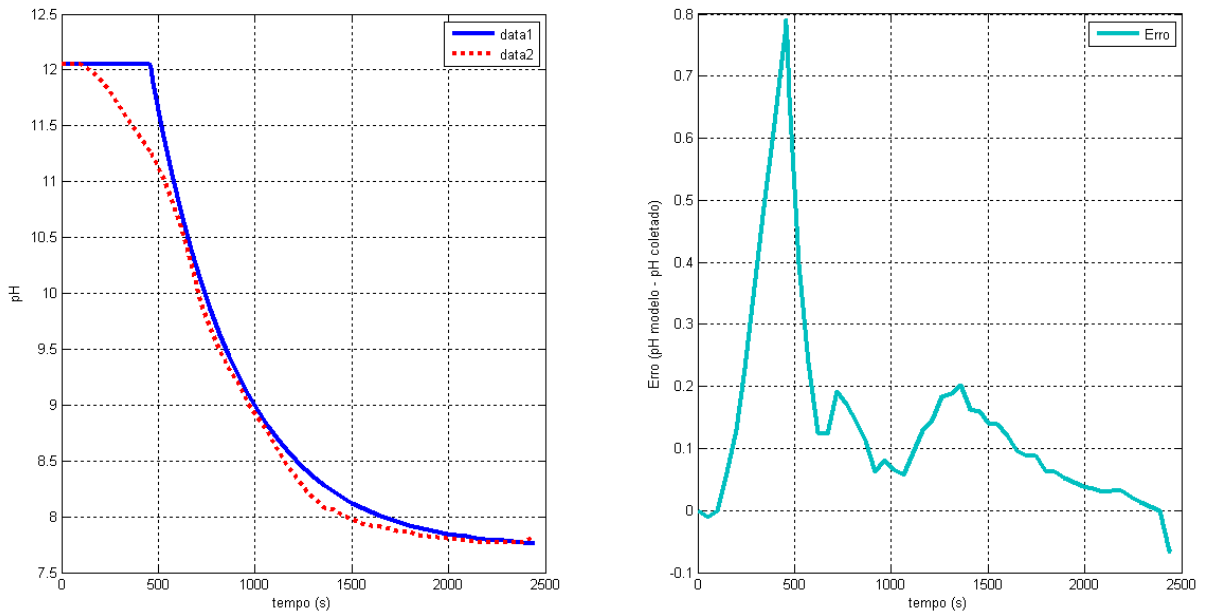


Figura 4.19 – Comportamento do pH coletado x modelado e o erro (pH modelo – pH coletado) para degrau na vazão de 0 para 7,5 L.min<sup>-1</sup>

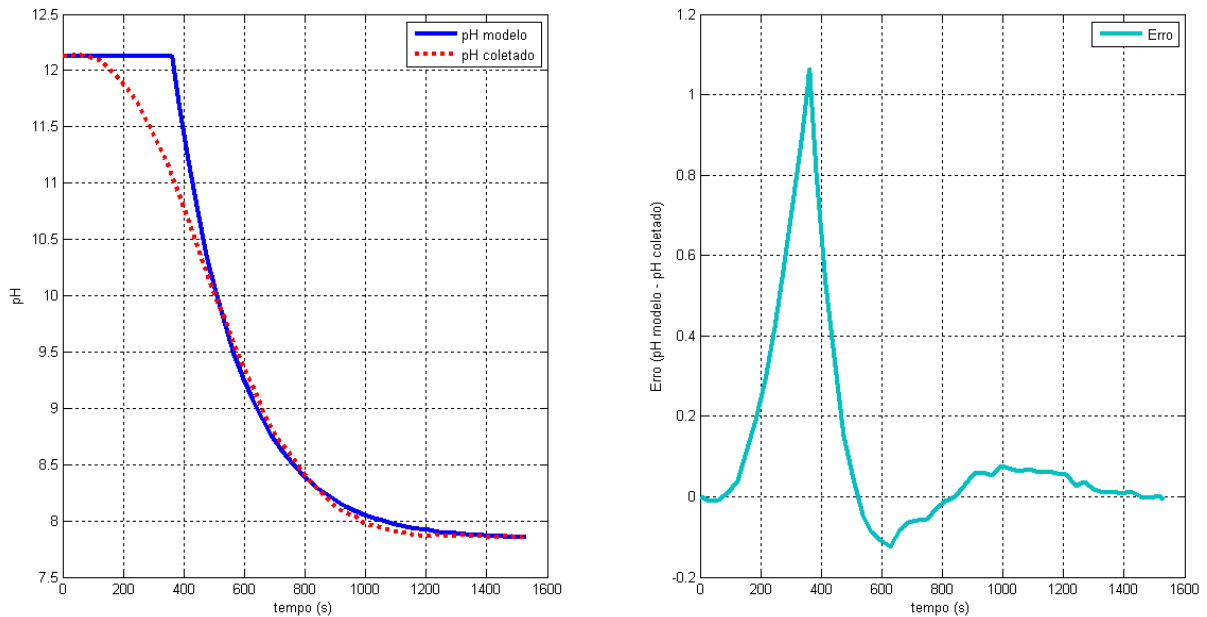


Figura 4.20 – Comportamento do pH coletado x modelado e o erro (pH modelo – pH coletado) para degrau na vazão de 0 para 12 L.min<sup>-1</sup>

Foram obtidos os seguintes parâmetros para a função de transferência que modela o comportamento do sistema:

- (i) para o degrau na vazão de 0 para 4 L.min<sup>-1</sup>:  $K = 1,083$  pH/L.min<sup>-1</sup>,  $\theta = 1108,5$  s;  $\tau = 691,5$  s;

$$G(s) = \frac{1,083.e^{-1108,5.s}}{691,5.s + 1} \quad (4.3)$$

- (ii) para o degrau na vazão de 0 para 7,5 L.min<sup>-1</sup>:  $K = 0,578$  pH/L.min<sup>-1</sup>,  $\theta = 457$  s;  $\tau = 442$  s;

$$G(s) = \frac{0,578.e^{-457.s}}{442.s + 1} \quad (4.4)$$

- (iii) para o degrau na vazão de 0 para 12 L.min<sup>-1</sup>:  $K = 0,358$  pH/L.min<sup>-1</sup>,  $\theta = 360,5$  s;  $\tau = 214,5$  s;

$$G(s) = \frac{0,358.e^{-360,5.s}}{214,5.s + 1} \quad (4.5)$$

Os gráficos (Figuras 4.18, 4.19 e 4.20) foram construídos com base nos Método de Smith e Miller (parâmetros de modelagem muito próximos) por serem métodos simples e representarem uma aproximação adequada considerando a identificação experimental aproximada dos parâmetros do modelo; estes foram plotados juntamente com os dados coletados com o objetivo de validar o modelo aproximado obtido.

Adicionalmente foi feita a análise do erro entre os dados modelados pelo método de Smith e os dados coletados. Observa-se que em todos os casos a representação do comportamento dinâmico da resposta do pH é suficiente para uma comparação e análise sem grande nível de detalhamento para os diferentes degraus para as vazões de interesse (0 - 4 L.min<sup>-1</sup>, 0 - 7,5 L.min<sup>-1</sup> e 0 - 12 L.min<sup>-1</sup>). Observa-se o erro menor quanto maior o degrau na vazão, pois a resposta tem mais caracterizado o atraso de transporte seguido de uma exponencial decrescente quanto maior este degrau, sendo



mais fácil a representação aproximada utilizada, a qual manipula estes parâmetros matematicamente.

Caso deseje-se representar e analisar a diferença entre as dinâmicas da vazão (com um erro menor entre o modelo e o comportamento real durante toda a resposta do pH), o ideal é a utilização de outra técnica de modelagem, o que motivou o uso de uma técnica de modelagem *Neuro-Fuzzy*.

#### **4.3.2.1.2 Modelagem – Sistema de Inferência *Fuzzy* Neuro-Adaptativo (ANFIS)**

A partir dos valores obtidos nos experimentos, foi realizada a modelagem do comportamento temporal dos valores de pH correspondentes às concentrações de NaOH presentes na água de enxágue efluente da saída do trocador de calor estudado através do aplicativo Simulink/MATLAB®, utilizando o sistema de inferência *Fuzzy* Neuro-Adaptativo ou ANFIS (do inglês – *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) . Para tal, foi utilizado o toolbox “*Fuzzy Logic*” do aplicativo MATLAB®, escolhendo-se o sistema de inferência “Sugeno”. Para esta modelagem, foram utilizados os dados com uma taxa de amostragem de 10 segundos.

Para o treinamento da rede foram utilizadas as repostas do pH para degraus de 0 L.min<sup>-1</sup> para 4 L.min<sup>-1</sup>, 6 L.min<sup>-1</sup>, 9 L.min<sup>-1</sup>, 10,5 L.min<sup>-1</sup>, 12 L.min<sup>-1</sup>, 14 L.min<sup>-1</sup> e 16 L.min<sup>-1</sup>, Inicialmente foi utilizada a vazão como entrada e o pH como saída. Os dados de entrada foram inseridos sequencialmente conforme se pode observar na figura 4.21.

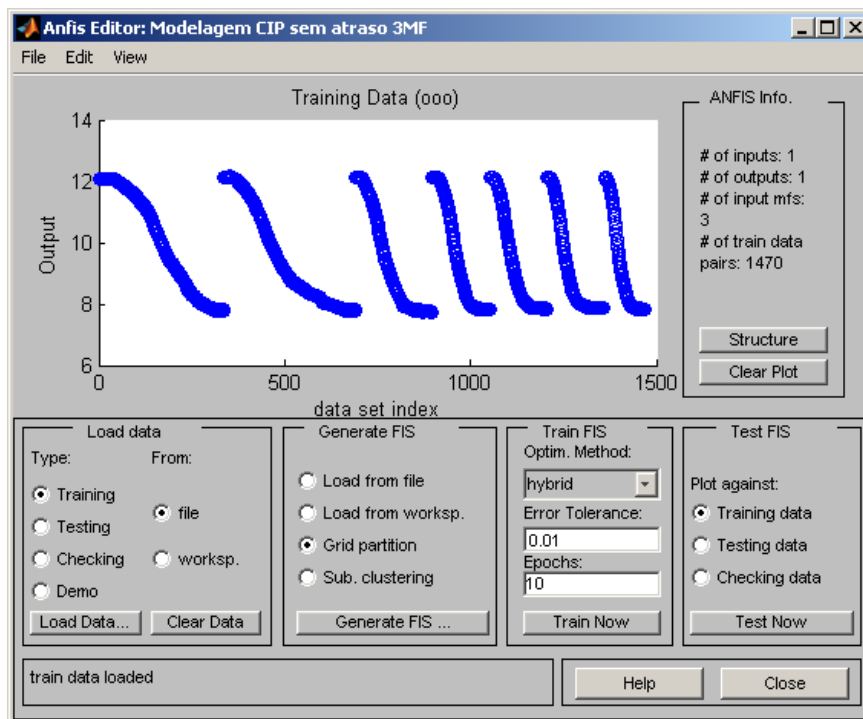


Figura 4.21 – Dados para o treinamento da rede com uma entrada e uma saída

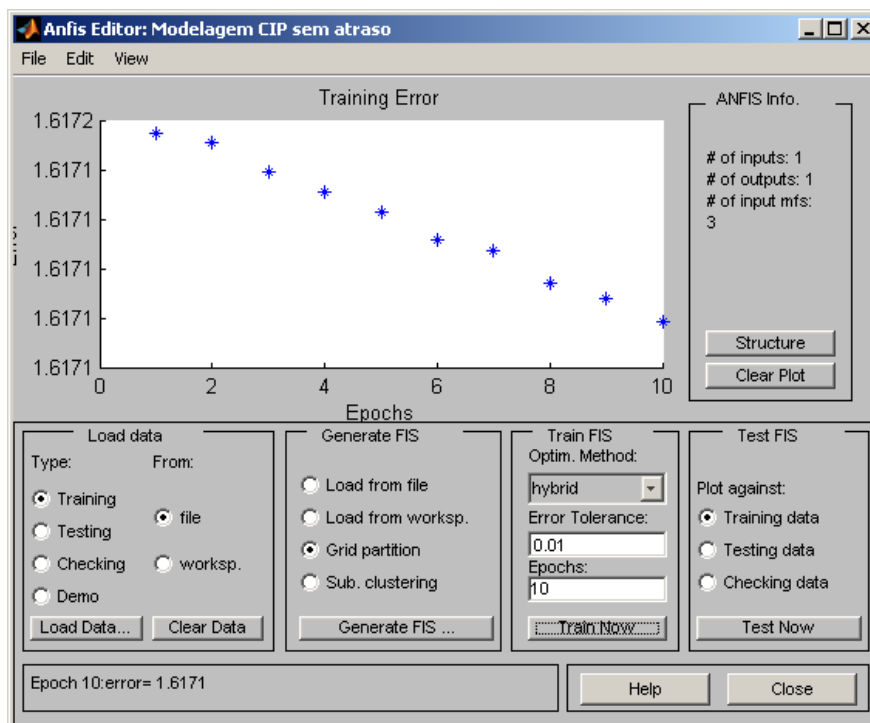


Figura 4.22 – Treinamento da rede com uma entrada e uma saída (grid partition)

Em seguida, para a geração do sistema de inferência *fuzzy* (utilizando-se o

algoritmo *grid partition* – partição para mapeamento mais eficiente da rede) através dos dados de treinamento, foram utilizadas 3 funções de pertinência do tipo triangular para os dados de entrada na **Análise 1**; a tolerância para o erro de 0,01 e 10 épocas (quantidade de iterações). O erro médio de treinamento da rede, em 10 épocas, foi 1,6171 (Figura 4.22).

As funções de pertinência obtidas, o modelo do sistema *fuzzy* desenvolvido e o gráfico da superfície de resposta são apresentados nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25, respectivamente.

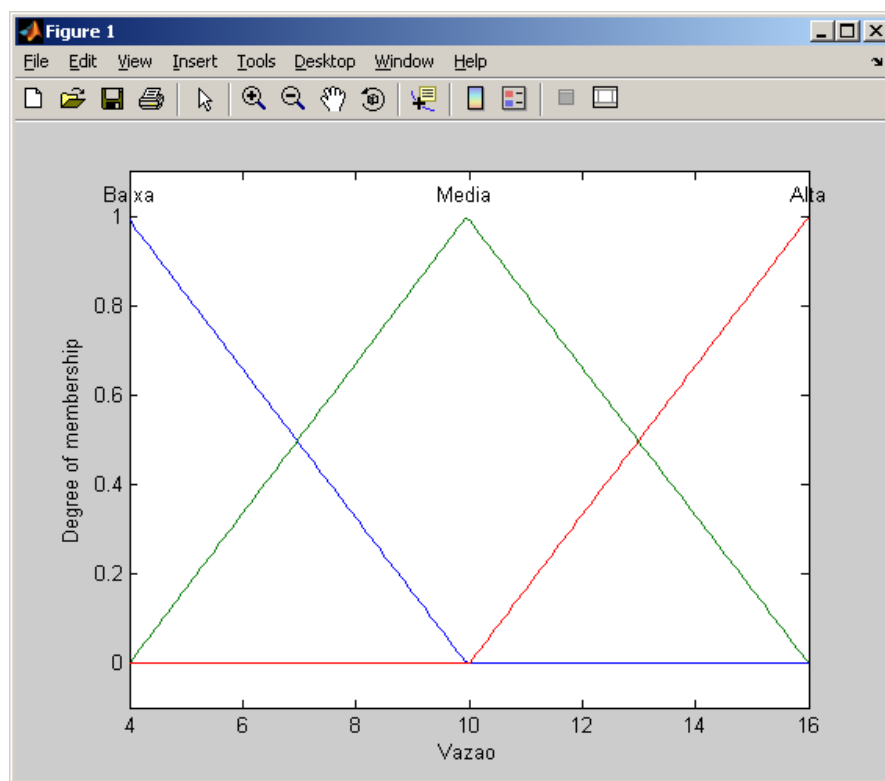


Figura 4.23 – Funções de pertinência triangulares (grid partition)

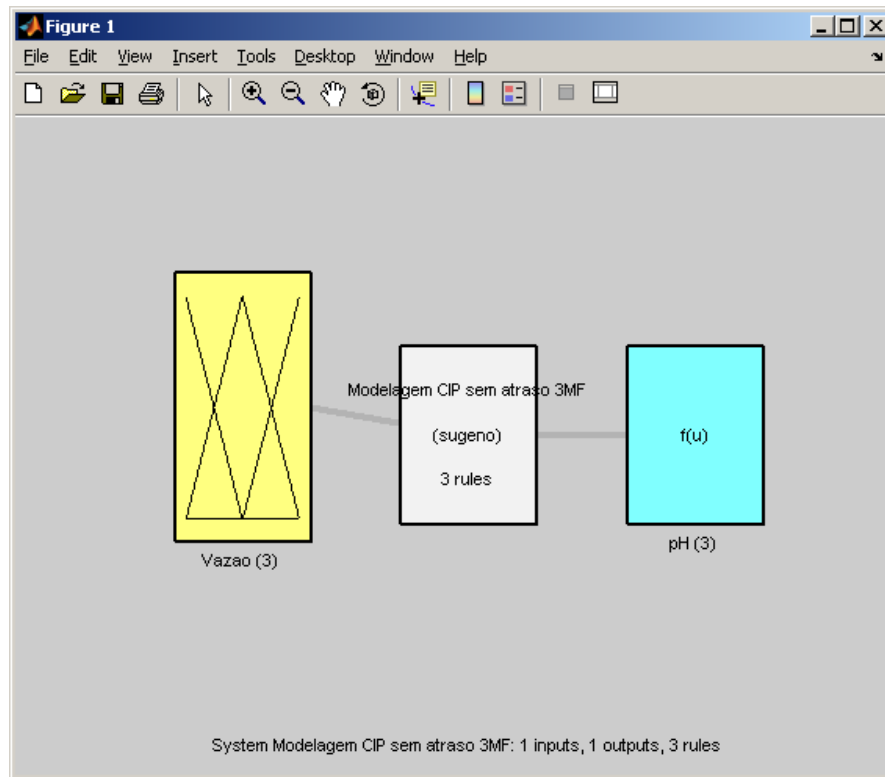


Figura 4.24 – Modelo do sistema Fuzzy desenvolvido (3 funções de pertinência – uma entrada e uma saída - grid partition)

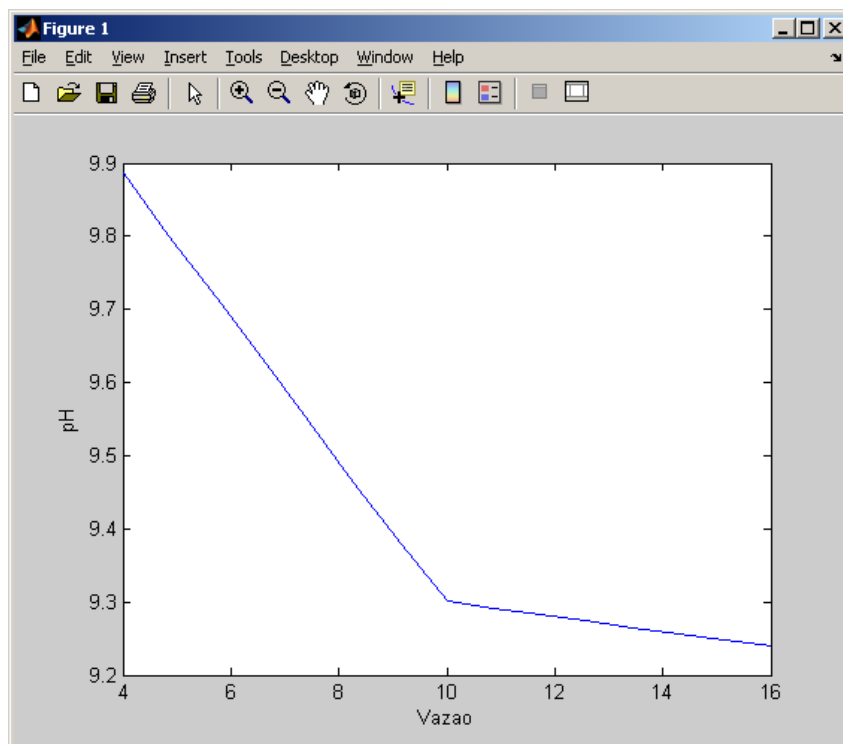


Figura 4.25 – Superfície de resposta (3 funções de pertinência – uma entrada e uma saída - grid partition)

Para validar o modelo, foi utilizada a resposta do pH para um degrau na vazão de 0 L.min<sup>-1</sup> para 7,5 L.min<sup>-1</sup>, obtendo-se um modelo que não representa a resposta do sistema (erro médio 1,6052) que é apresentado na figura 4.26.

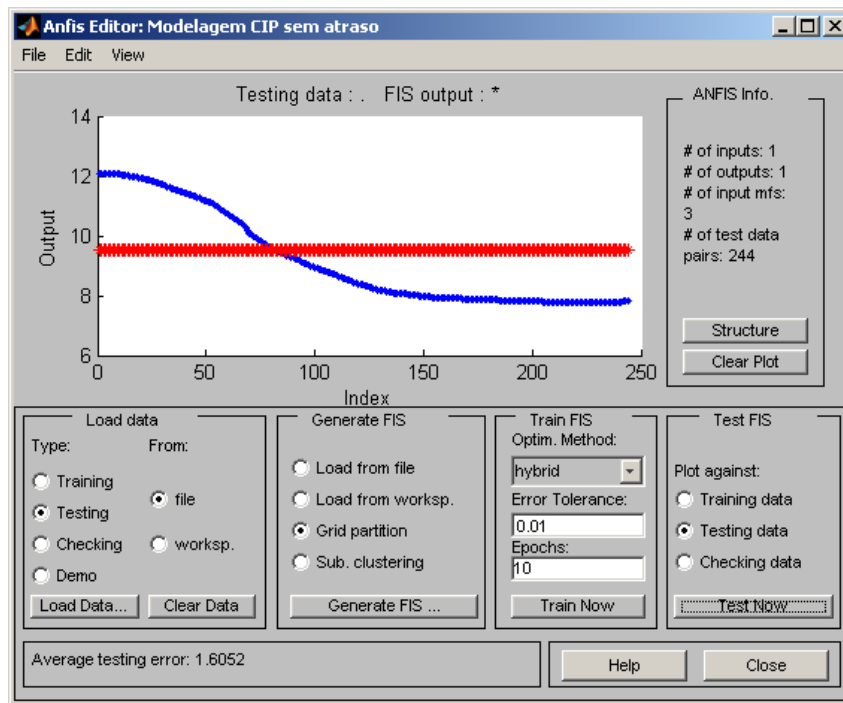


Figura 4.26 – Modelo ANFIS do pH coletado X pH modelado para um degrau na vazão de 0 L.min<sup>-1</sup> para 7,5 L.min<sup>-1</sup> (grid partition com três funções de pertinência triangulares)

Na tentativa de obter-se um modelo adequado com os mesmos dados de entrada e saída, foi utilizado, na sequência, o algoritmo *Subtractive clustering* na **Análise 2** (algoritmo rápido que estima o número de agrupamentos - para representação concisa do comportamento do sistema - e o centro dos agrupamentos em um conjunto de dados) para o treinamento da rede e geração do sistema de inferência *fuzzy* (Figura 4.27); a tolerância para o erro utilizada foi de 0,01 e 10 épocas (quantidade de iterações). O erro médio de treinamento da rede (gerado pelo Matlab<sup>®</sup>), em 10 épocas, foi 1,6115.

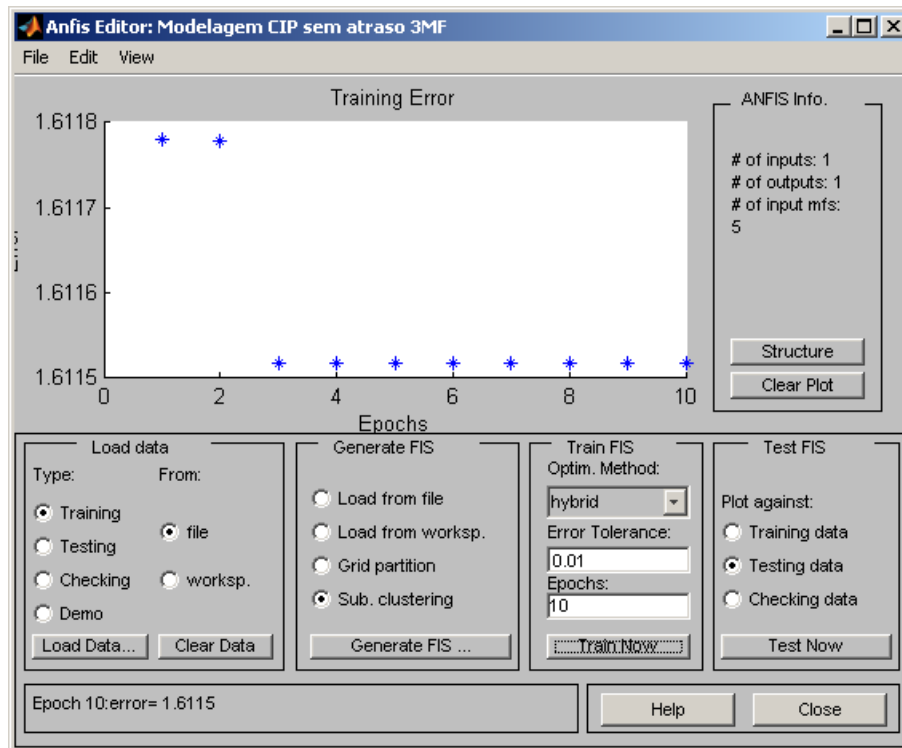


Figura 4.27 – Treinamento da rede com uma entrada e uma saída (subtractive clustering)

As funções de pertinência obtidas, o modelo do sistema *fuzzy* desenvolvido e o gráfico da superfície de resposta são apresentados nas Figuras 4.28, 4.29 e 4.30, respectivamente.

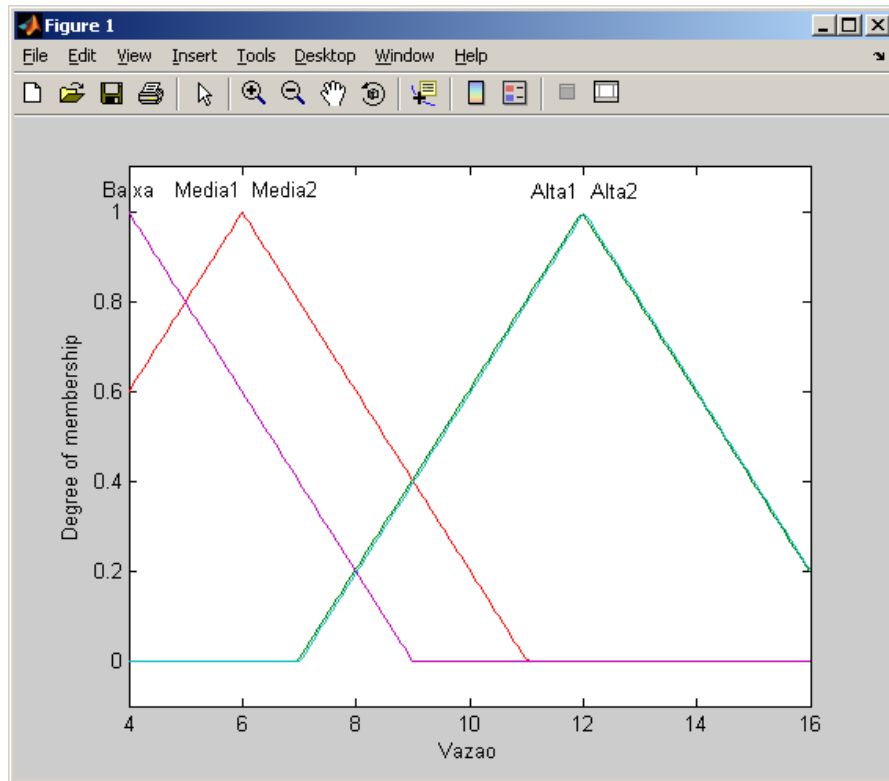


Figura 4.28 – Funções de pertinência triangulares (subtractive clustering)

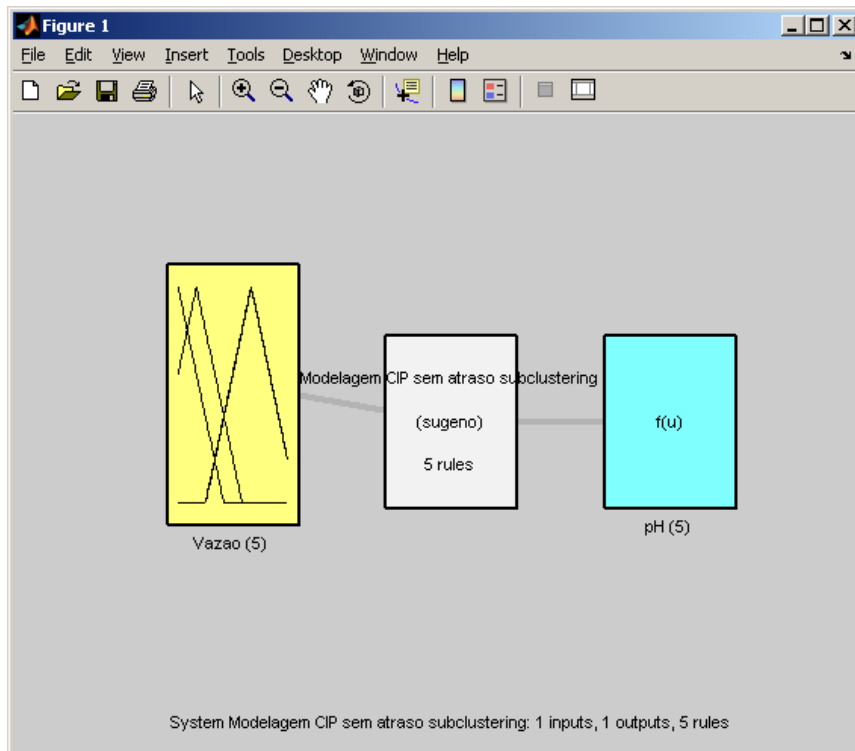


Figura 4.29 – Modelo do sistema Fuzzy desenvolvido (3 funções de pertinência – uma entrada e uma saída - subtractive clustering)

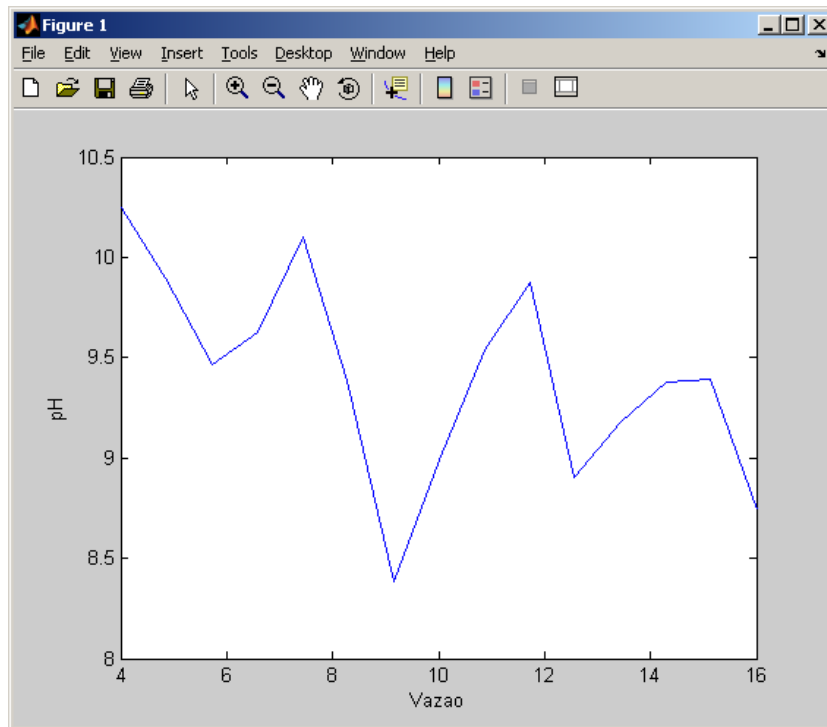


Figura 4.30 – Superfície de resposta (3 funções de pertinência – uma entrada e uma saída - subtractive clustering)

Para validar o modelo, foi novamente utilizada a resposta do pH para um degrau na vazão de  $0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  para  $7,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , obtendo-se também um modelo que não representa a resposta do sistema (erro médio 1,5618) que é apresentado na figura 4.31.



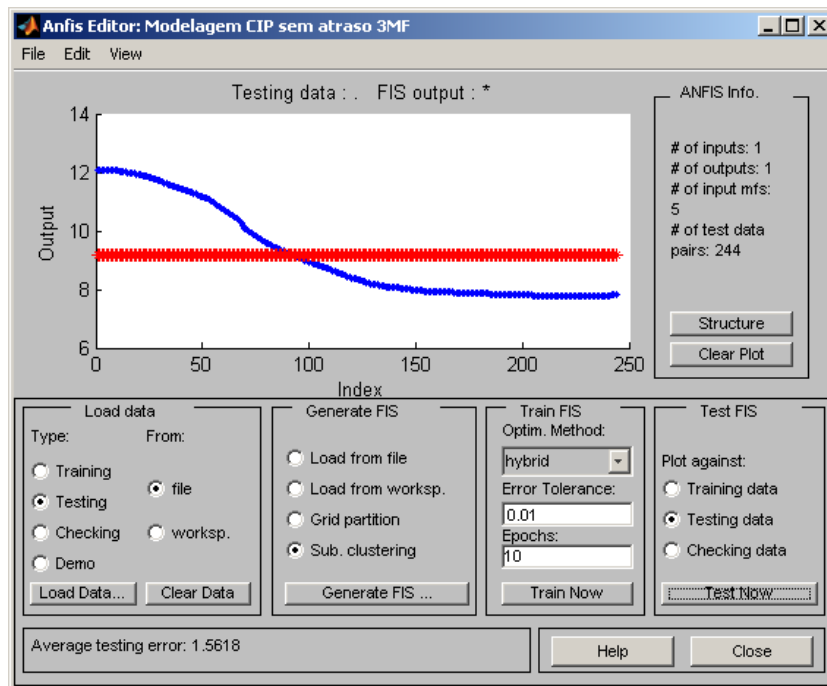


Figura 4.31 – Modelo ANFIS do pH coletado X pH modelado para um degrau na vazão de  $0 \text{ L.min}^{-1}$  para  $7,5 \text{ L.min}^{-1}$  (subtractive clustering)

Fica claro que a quantidade de dados para o treinamento da rede foi insuficiente, pois não foi possível validar o modelo para os dados coletados mesmo utilizando diferentes algoritmos de estimativa do comportamento do sistema (com o intuito de gerar regras de decisão mais adequadas e conseqüentemente maior refinamento); logo, não foram apresentadas as regras por não terem sentido prático e foi inserida mais uma entrada para o treinamento da rede (figura 4.32), sendo esta a saída atrasada pH  $[k-1]$ . Deste modo, foram utilizadas a vazão atual ( $F[k]$ ) e o pH atrasado de uma amostragem ( $\text{pH}[k-1]$ ) como entradas e o pH atual ( $\text{pH}[k]$ ) como saída, ou seja, a rede será treinada com mais parâmetros de entrada (mais informações).

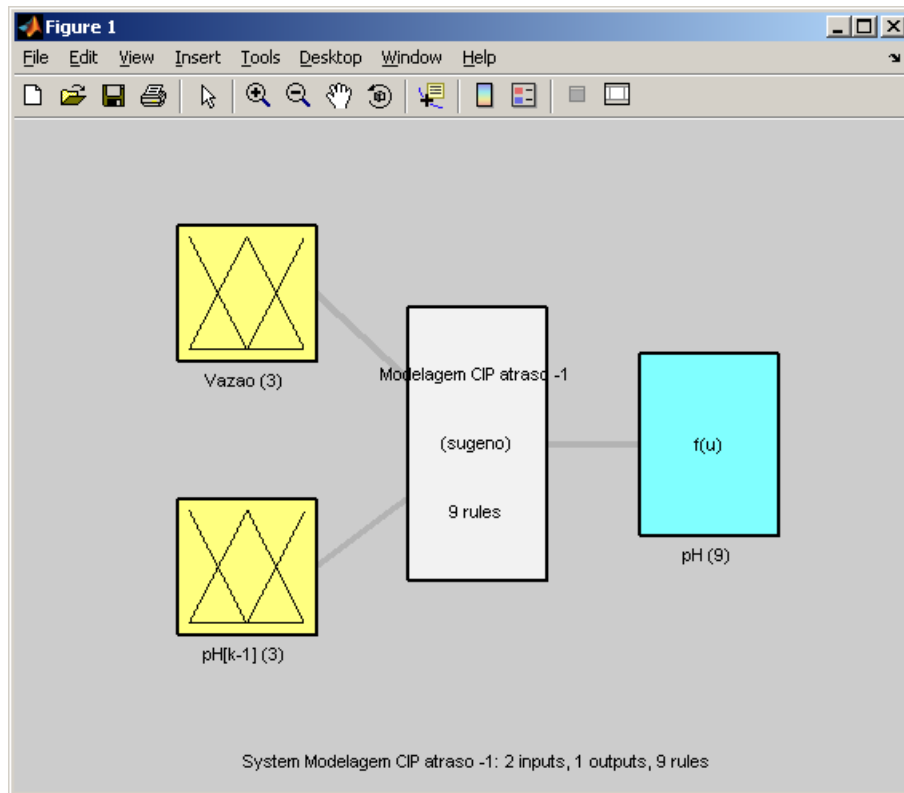


Figura 4.32 – Dados para o treinamento da rede com duas entradas e uma saída (grid partition)

Os dados para treinar a rede foram novamente inseridos sequencialmente (conforme já apresentado na Figura 4.21). Para a geração do sistema de inferência *fuzzy* (FIS) através dos dados de treinamento, foram utilizadas 3 funções de pertinência do tipo triangular para os dados de entrada na **Análise 3**; a tolerância para o erro de 0,01 e 10 épocas. Foi utilizado o algoritmo *grid partition* para geração das funções de pertinência. O erro médio de treinamento da rede (gerado pelo Matlab<sup>®</sup>), atingido em 4 épocas, foi 0,0099.

A figura 4.33 mostra as funções de pertinência obtidas da entrada Vazão e a Figura 4.34 mostra as funções de pertinência obtidas da entrada pH [k-1]. As regras criadas são apresentadas na Figura 4.35 e na Figura 4.36 a superfície de resposta.

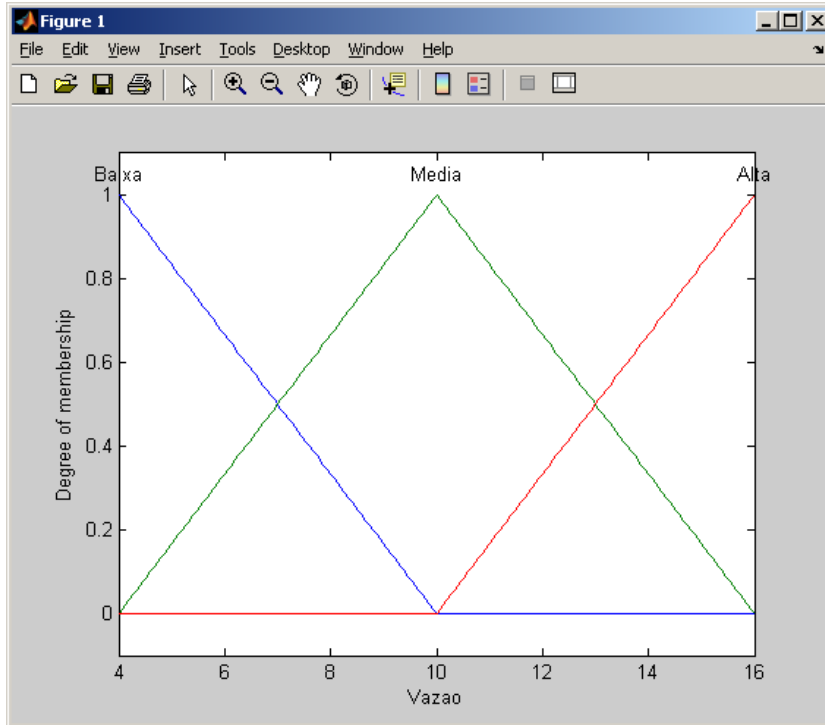


Figura 4.33 – Entrada - Vazão para o treinamento da rede (grid partition)

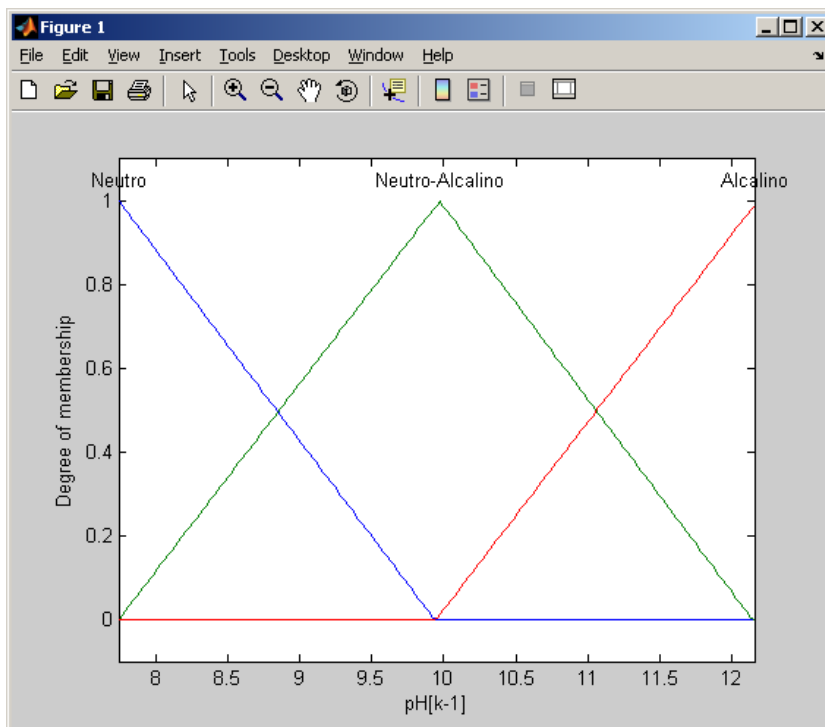


Figura 4.34 – Entrada – pH atrasado em 1 amostragem para o treinamento da rede (grid partition)

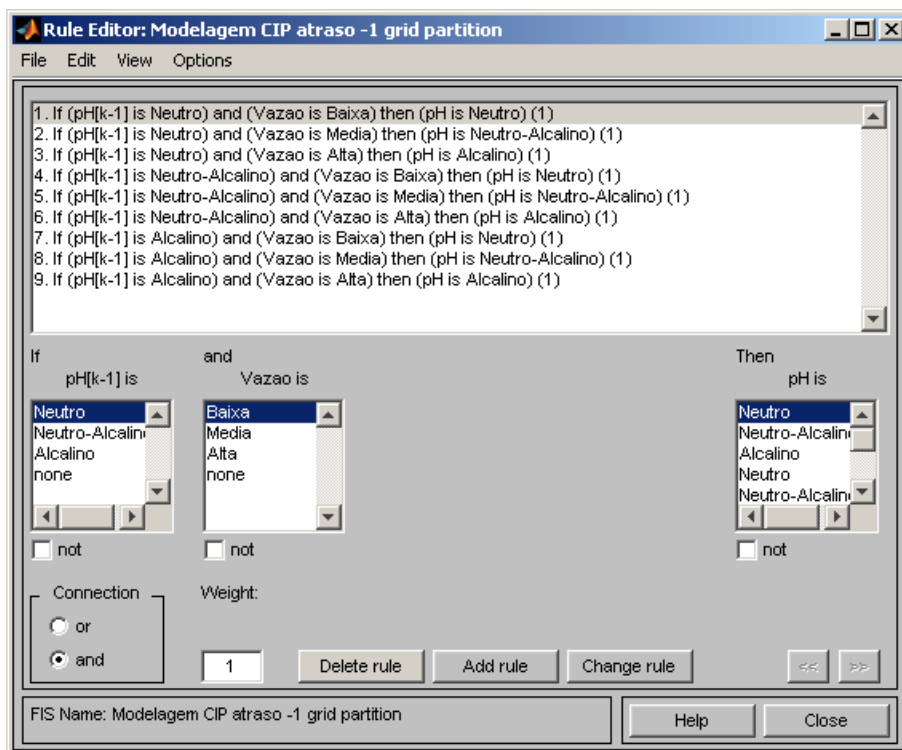


Figura 4.35 – Regras do modelo com duas entradas e uma saída (grid partition)

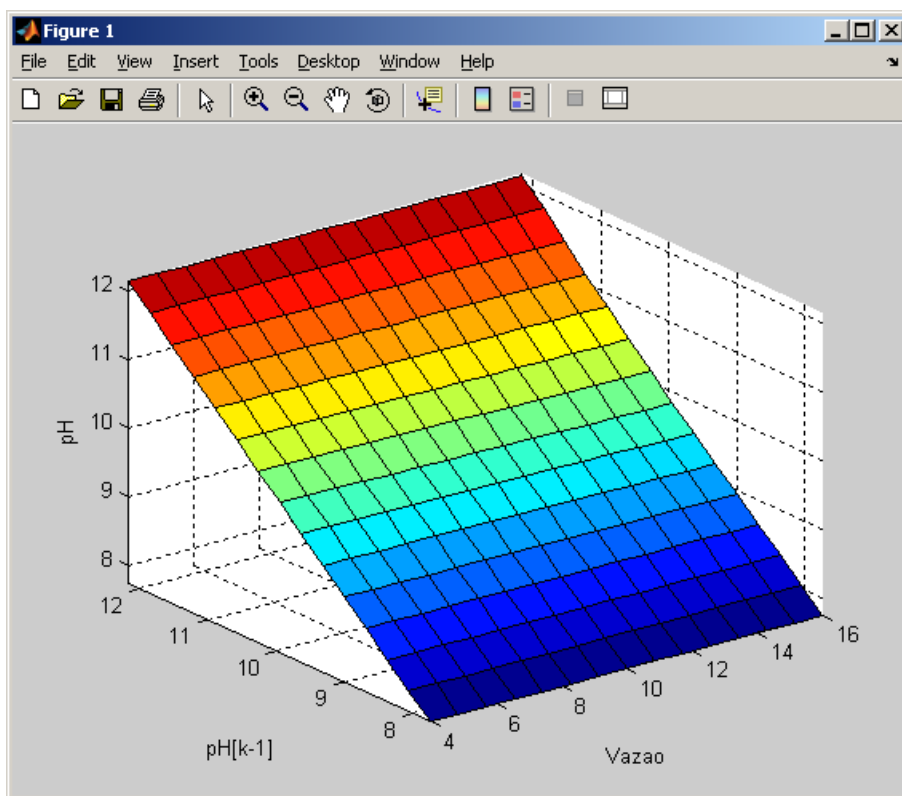


Figura 4.36 – Superfície de resposta do modelo com duas entradas e uma saída (grid partition)

As 9 regras obtidas estão apresentadas na Tabela 4.8. Os termos linguísticos utilizados nas funções de pertinência das variáveis de entrada (pH atrasado de uma amostragem) e saída (pH) foram: Neutro, Neutro-Alcalino e Alcalino; os termos linguísticos da variável de entrada (vazão) foram: Baixa, Média e Alta.

Tabela 4.8 – Regras obtidas para o modelo com duas entradas e uma saída (grid partition)

pH [k-1]	Vazão (L.min <sup>-1</sup> )		
	Baixa	Média	Alta
Neutro	Neutro	Neutro-Alcalino	Alcalino
Neutro-Alcalino	Neutro	Neutro-Alcalino	Alcalino
Alcalino	Neutro	Neutro-Alcalino	Alcalino

Para validar o modelo, foi utilizada a resposta do pH para um degrau na vazão de 0 L.min<sup>-1</sup> para 7,5 L.min<sup>-1</sup>, obtendo-se a resposta com erro médio de 0,011 entre o modelo e os dados de validação do modelo.

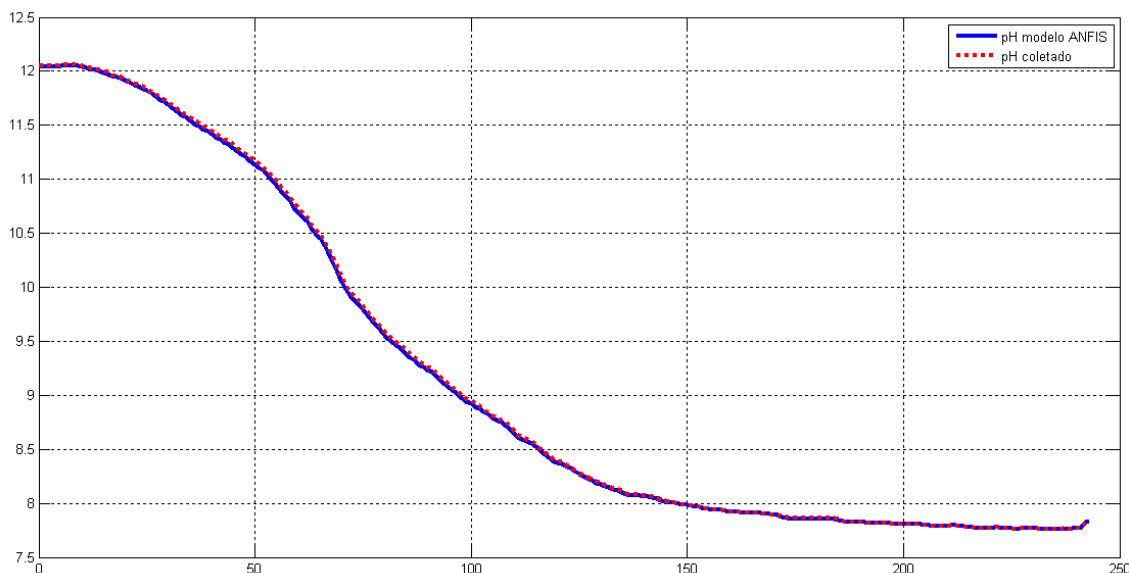


Figura 4.37 – Modelo ANFIS do pH coletado X pH modelado para um degrau na vazão de 0 L.min<sup>-1</sup> para 7,5L.min<sup>-1</sup> (grid partition)

Observa-se (Figura 4.37) um modelo que representa de forma adequada a resposta do sistema com um pequeno erro; na sequência foi realizada a modelagem utilizando o algoritmo *subtractive clustering* com o objetivo de compararem-se as

diferenças entre os algoritmos para o treinamento da rede e geração do sistema de inferência *fuzzy*.

Foram novamente utilizadas a vazão atual ( $F[k]$ ) e o pH atrasado de uma amostragem ( $pH[k-1]$ ) como entradas e o pH atual ( $pH[k]$ ) como saída (Figura 4.38).

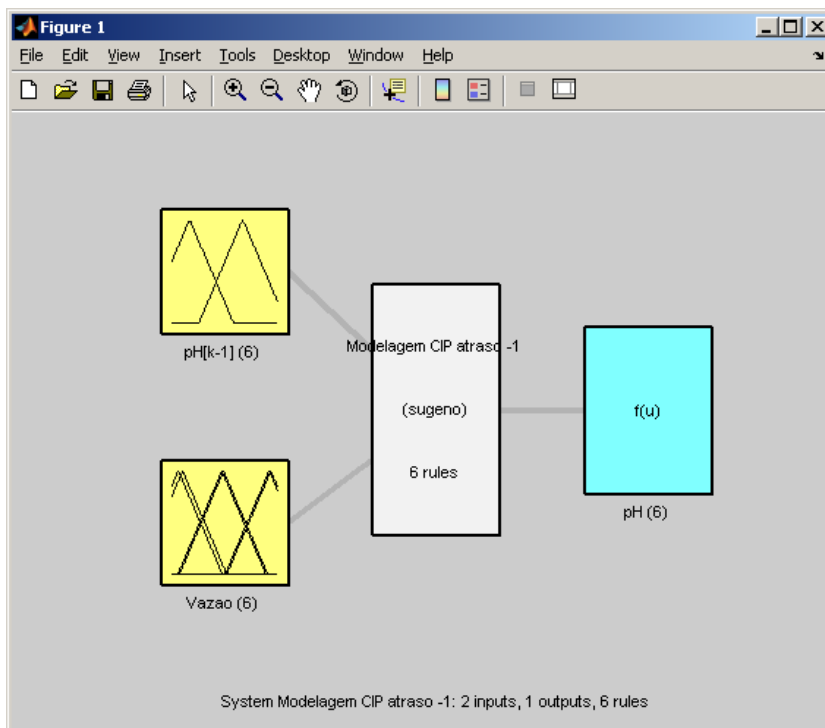


Figura 4.38 – Dados para o treinamento da rede com duas entradas e uma saída (subtractive clustering)

Os dados para treinar a rede foram novamente inseridos sequencialmente (conforme já apresentado na Figura 4.21). Para a geração do sistema de inferência *fuzzy* (FIS) através dos dados de treinamento, foram utilizadas 6 funções de pertinência do tipo triangular para os dados de entrada na **Análise 4** (utilizando os parâmetros padrão); a tolerância utilizada para o erro foi de 0,01 e 10 épocas. O erro médio de treinamento da rede (gerado pelo Matlab<sup>®</sup>), atingido em 1 época, foi 0,0092.

A figura 4.39 mostra as funções de pertinência obtidas da entrada Vazão e a Figura 4.40 mostra as funções de pertinência obtidas da entrada pH [k-1]. As regras criadas são apresentadas na Figura 4.41 e na Figura 4.42 a superfície de resposta.

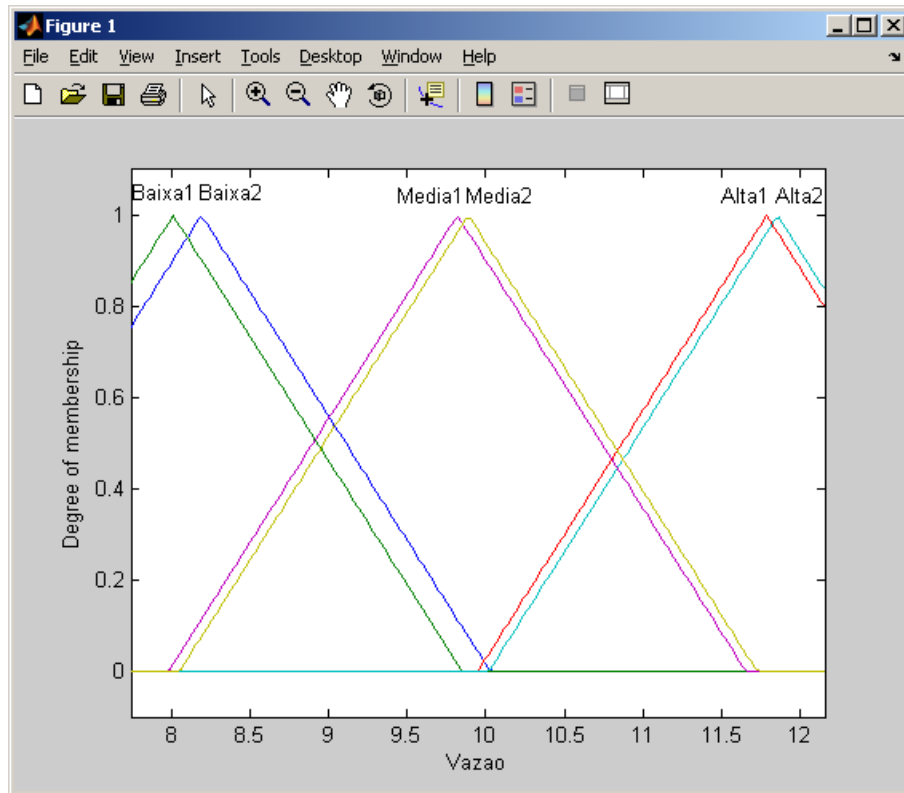


Figura 4.39 – Entrada - Vazão para o treinamento da rede (subtractive clustering)

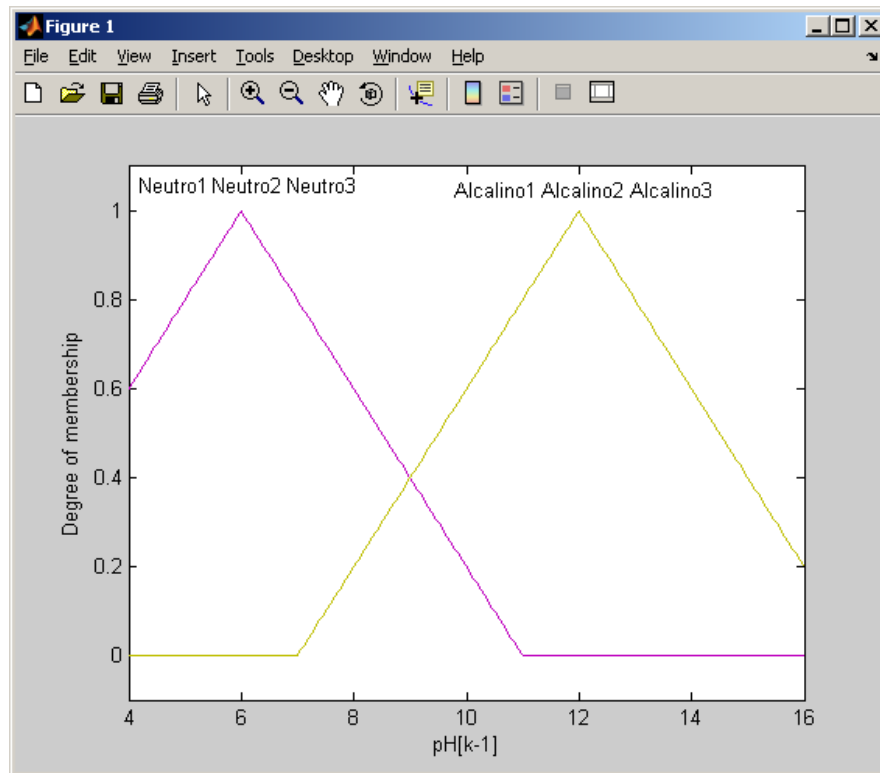


Figura 4.40 – Entrada – pH atrasado em 1 amostragem para o treinamento da rede (subtractive clustering)

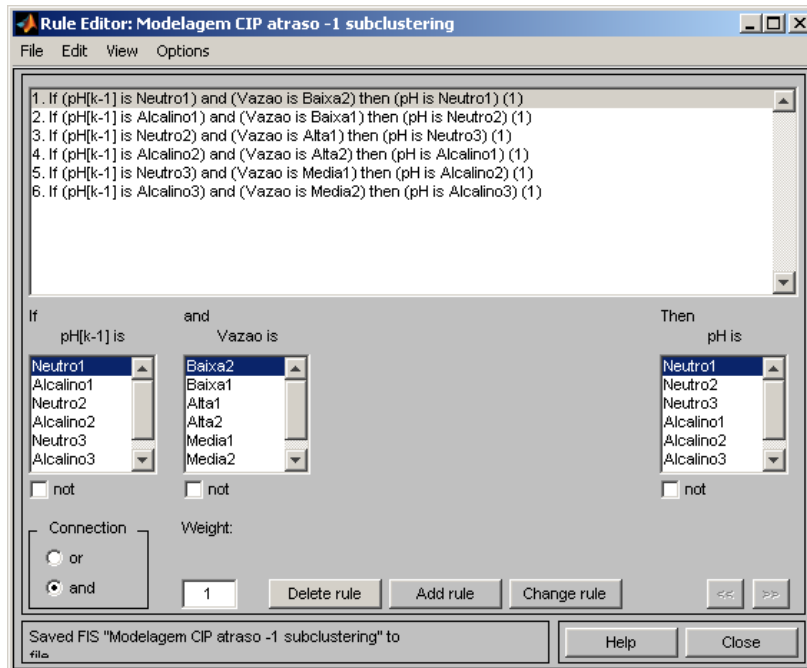


Figura 4.41 – Regras do modelo com duas entradas e uma saída (subtractive clustering)

As 6 regras obtidas estão apresentadas na Tabela 4.9. Os termos linguísticos utilizados nas funções de pertinência das variáveis de entrada (pH atrasado de uma amostragem) e saída (pH) foram: Neutro1, Neutro2, Neutro3, Alcalino1, Alcalino2 e Alcalino3; os termos linguísticos da variável de entrada (vazão) foram: Baixa1, Média1, Alta1, Baixa2, Média2 e Alta2.



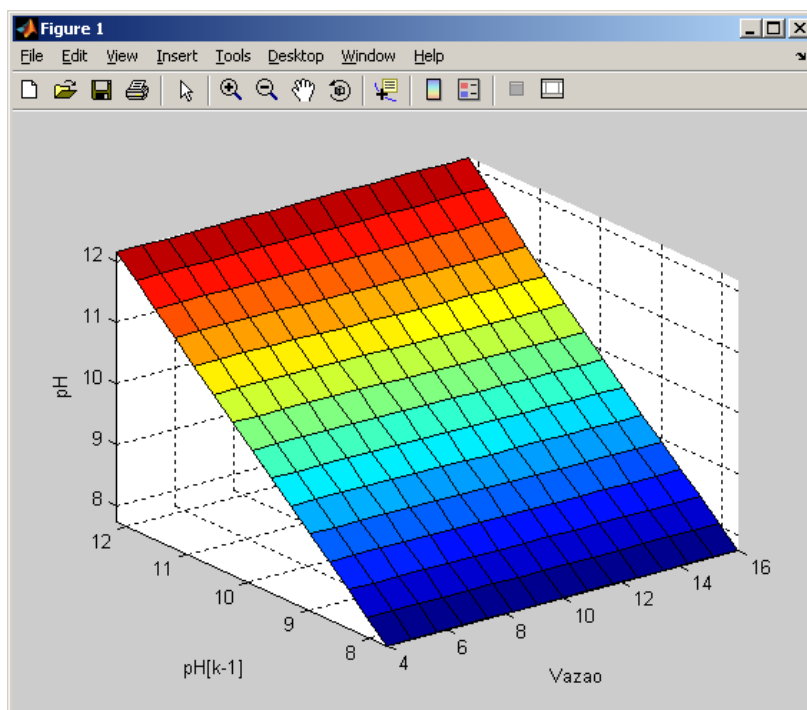


Figura 4.42 – Superfície de resposta do modelo com duas entradas e uma saída (subtractive clustering)

Tabela 4.9 – Regras obtidas para o modelo com duas entradas e uma saída (subtractive clustering)

pH [k-1]	Vazão (L.min <sup>-1</sup> )					
	Baixa2	Baixa1	Alta1	Alta2	Média1	Média2
Neutro1	Neutro1					
Alcalino1		Neutro2				
Neutro2			Neutro3			
Alcalino2				Alcalino1		
Neutro3					Alcalino2	
Alcalino3						Alcalino3

Para validar o modelo, foi utilizada a resposta do pH para um degrau na vazão de 0 L.min<sup>-1</sup> para 7,5 L.min<sup>-1</sup>, obtendo-se a resposta com erro médio de 0,011 entre o modelo e os dados de validação do modelo.

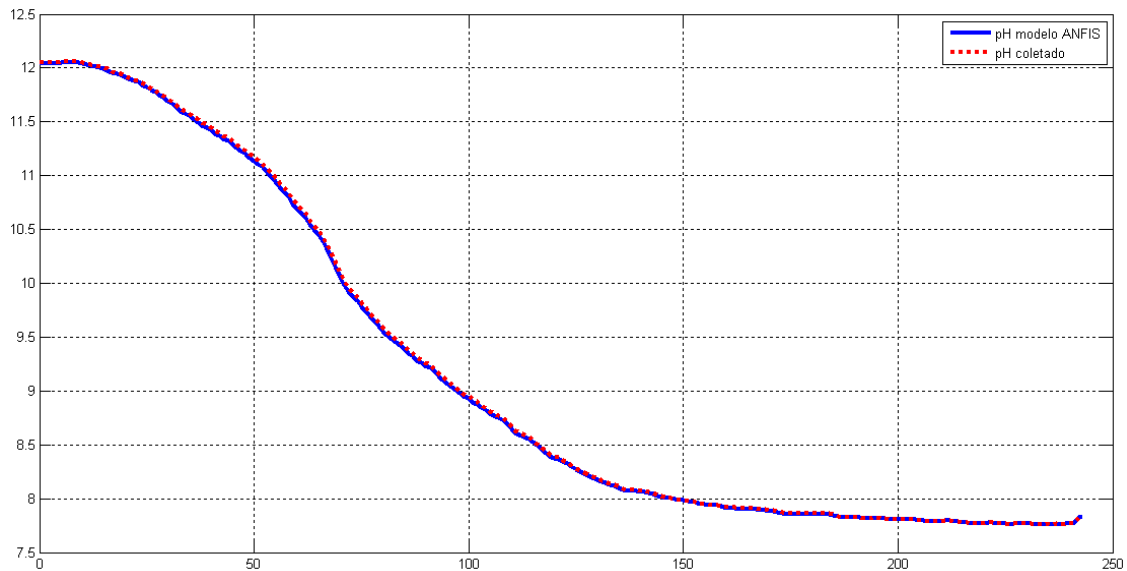


Figura 4.43 – Modelo ANFIS do pH coletado X pH modelado para um degrau na vazão de 0 L.min<sup>-1</sup> para 7,5L.min<sup>-1</sup> (*subtractive clustering*)

Observa-se (Figura 4.43) que não houve melhora (praticamente sem alteração com relação ao modelo com 3 funções de pertinência triangulares utilizando o algoritmo *grid partition* para geração das funções de pertinência). O modelo utilizando o algoritmo *subtractive clustering* apresenta o mesmo erro com uma quantidade menor de regras, o que no caso não é uma vantagem.

Como tentativa adicional foram novamente utilizadas a vazão atual ( $F[k]$ ) e o pH atrasado de uma amostragem ( $pH[k-1]$ ) como entradas e o pH atual ( $pH[k]$ ) como saída (Figura 4.44).

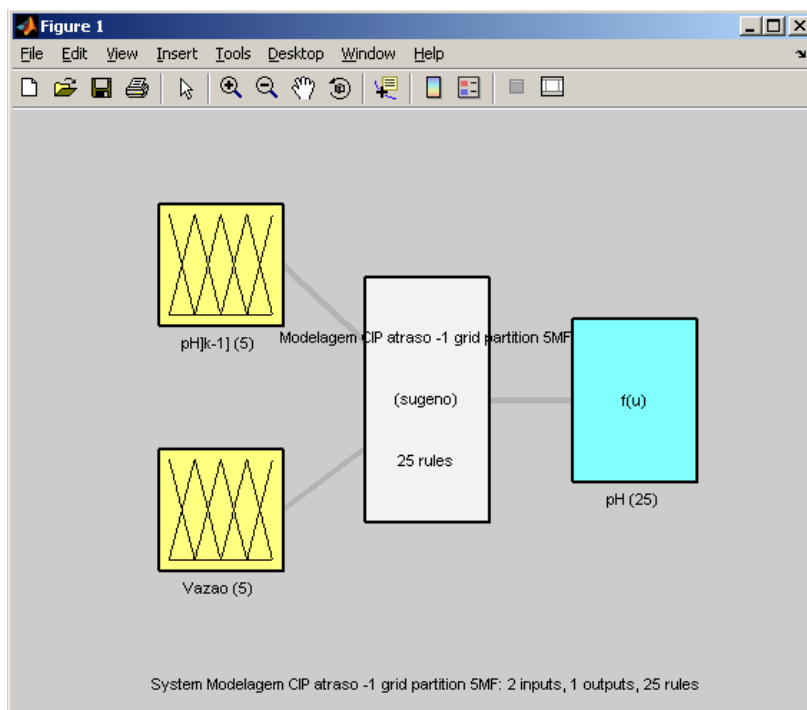


Figura 4.44 – Dados para o treinamento da rede com duas entradas e uma saída (subtractive clustering)

Os dados para treinar a rede foram novamente inseridos sequencialmente (conforme já apresentado na Figura 4.21).

Como tentativa adicional de redução do erro de treinamento, aumentou-se o número de funções de pertinência para os dados de entrada para 5 na **Análise 5**; a tolerância para o erro de 0,01 e 10 épocas. Foi utilizado o algoritmo *grid partition* para geração das funções de pertinência. O erro médio de treinamento da rede (gerado pelo Matlab<sup>®</sup>), atingido em 1 época, foi 0,0089.

A figura 4.45 mostra as funções de pertinência obtidas da entrada Vazão e a Figura 4.46 mostra as funções de pertinência obtidas da entrada pH [k-1]. As regras criadas são apresentadas nas Figuras 4.47a e 4.47b e na Figura 4.48 a superfície de resposta.

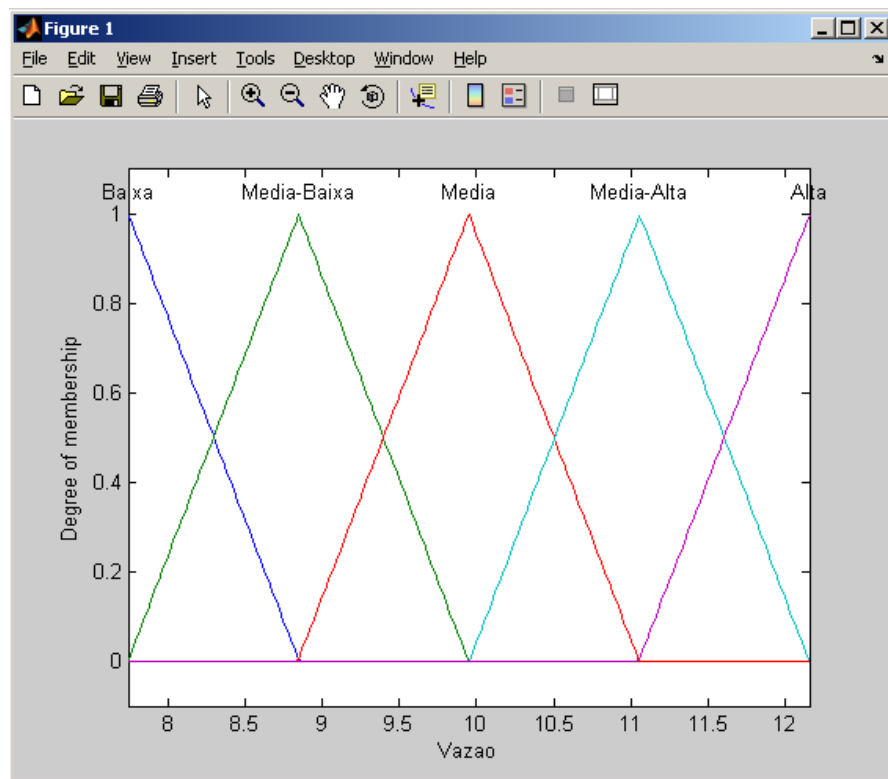


Figura 4.45 – Entrada - Vazão para o treinamento da rede (grid partition)

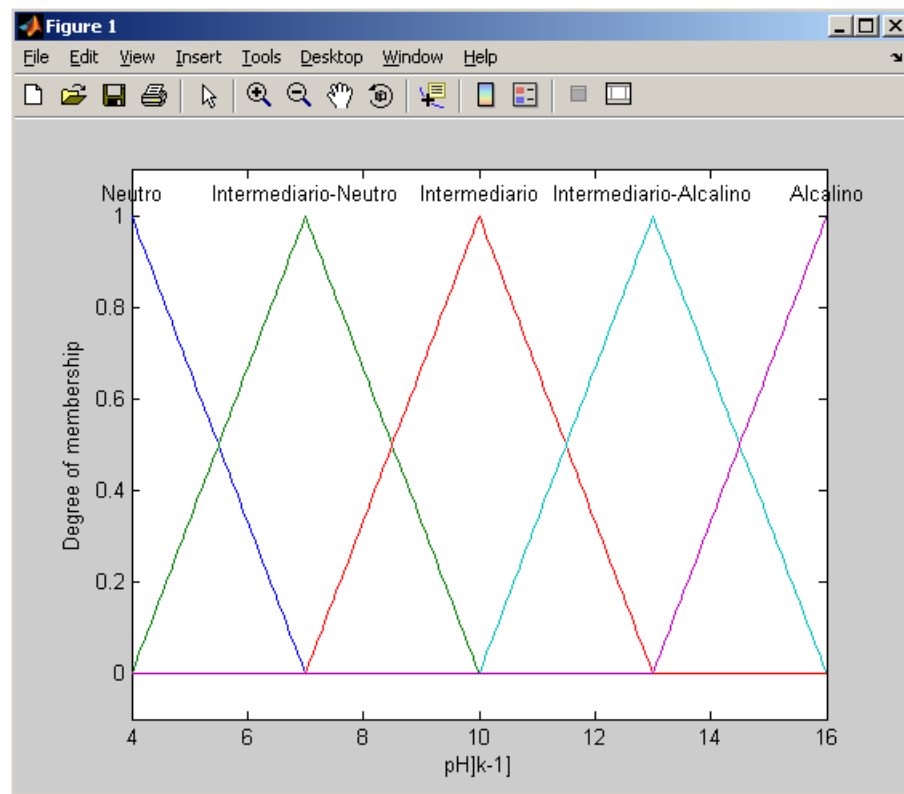


Figura 4.46 – Entrada – pH atrasado em 1 amostragem para o treinamento da rede (grid partition)

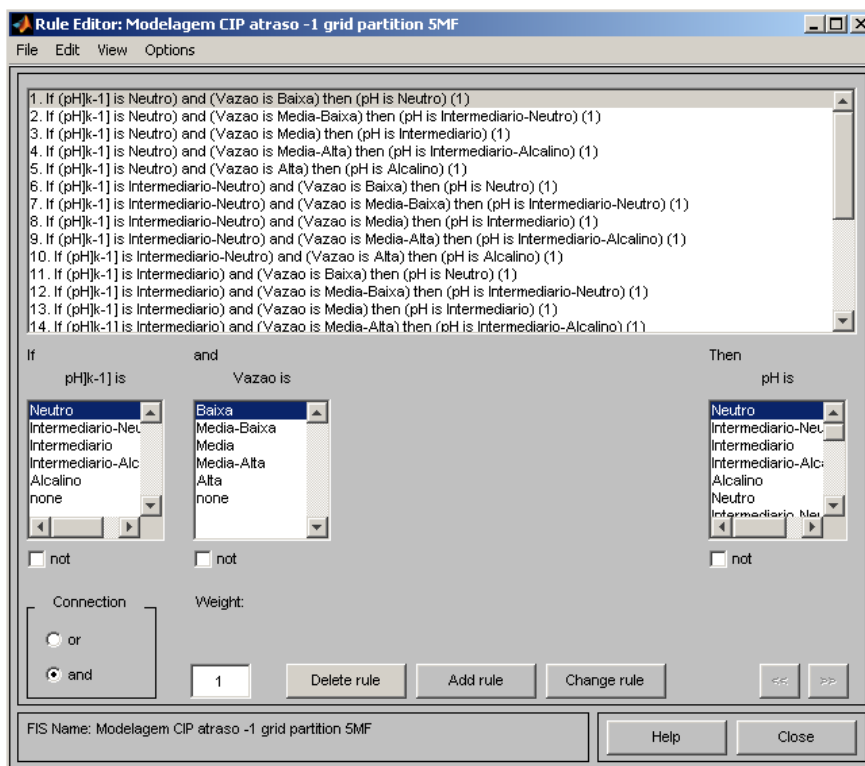


Figura 4.47a – Regras do modelo com duas entradas e uma saída (*grid partition*)

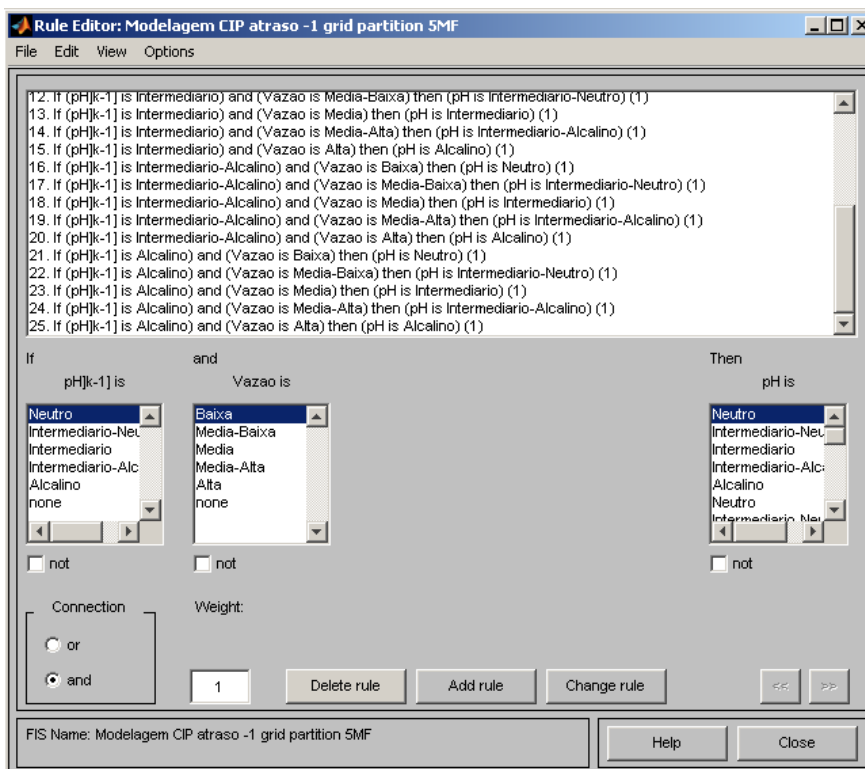


Figura 4.47b – Regras do modelo com duas entradas e uma saída (*grid partition*) – continuação

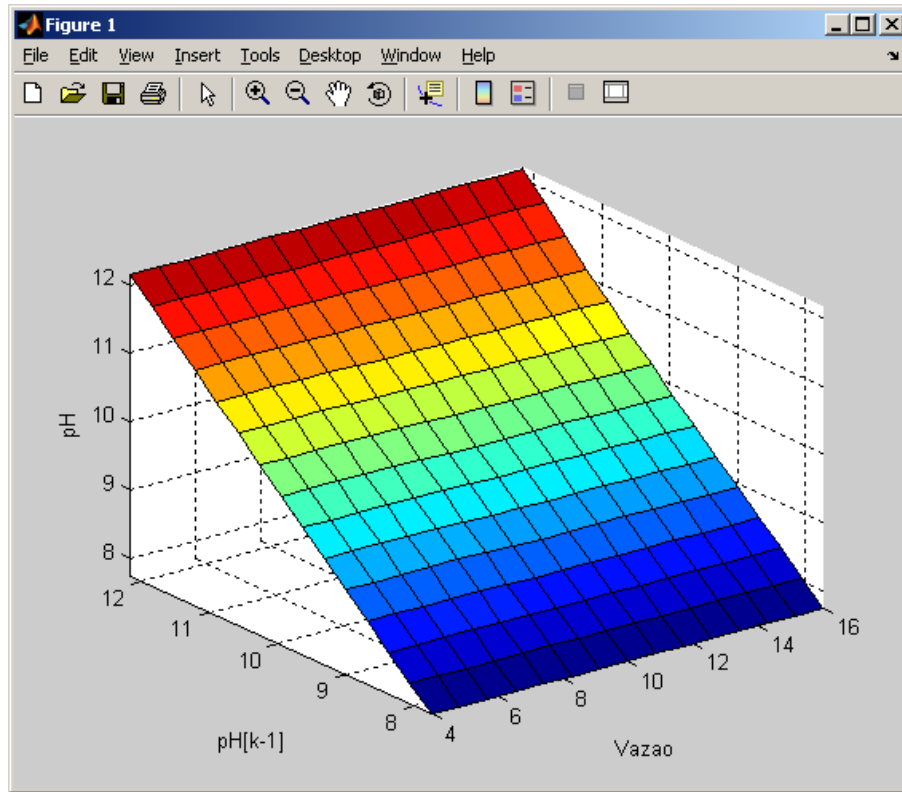


Figura 4.48 – Superfície de resposta do modelo com duas entradas e uma saída (*grid partition*)

As 25 regras obtidas estão apresentadas na Tabela 4.10. Os termos linguísticos utilizados nas funções de pertinência das variáveis de entrada (pH atrasado de uma amostragem) e saída (pH) foram: Neutro, Intermediário-Neutro, Intermediário, Intermediário-Alcalino e Alcalino; os termos linguísticos da variável de entrada (vazão) foram: Baixa, Média-Baixa, Média, Média-Alta e Alta.

Tabela 4.10 – Regras obtidas para o modelo com duas entradas e uma saída (*grid partition*)

pH [k-1]	Vazão (L.min <sup>-1</sup> )				
	Baixa	Média-Baixa	Média	Média-Alta	Alta
Neutro	Neutro	Intermediário-Neutro	Intermediário	Intermediário-Alcalino	Alcalino
Intermediário-Neutro	Neutro	Intermediário-Neutro	Intermediário	Intermediário-Alcalino	Alcalino
Intermediário	Neutro	Intermediário-Neutro	Intermediário	Intermediário-Alcalino	Alcalino
Intermediário-Alcalino	Neutro	Intermediário-Neutro	Intermediário	Intermediário-Alcalino	Alcalino
Alcalino	Neutro	Intermediário-Neutro	Intermediário	Intermediário-Alcalino	Alcalino

Para validar o modelo, foi utilizada a resposta do pH para um degrau na vazão

de 0 L.min<sup>-1</sup> para 7,5 L.min<sup>-1</sup>, obtendo-se a resposta com erro médio de 0,011 entre o modelo e os dados de validação do modelo.

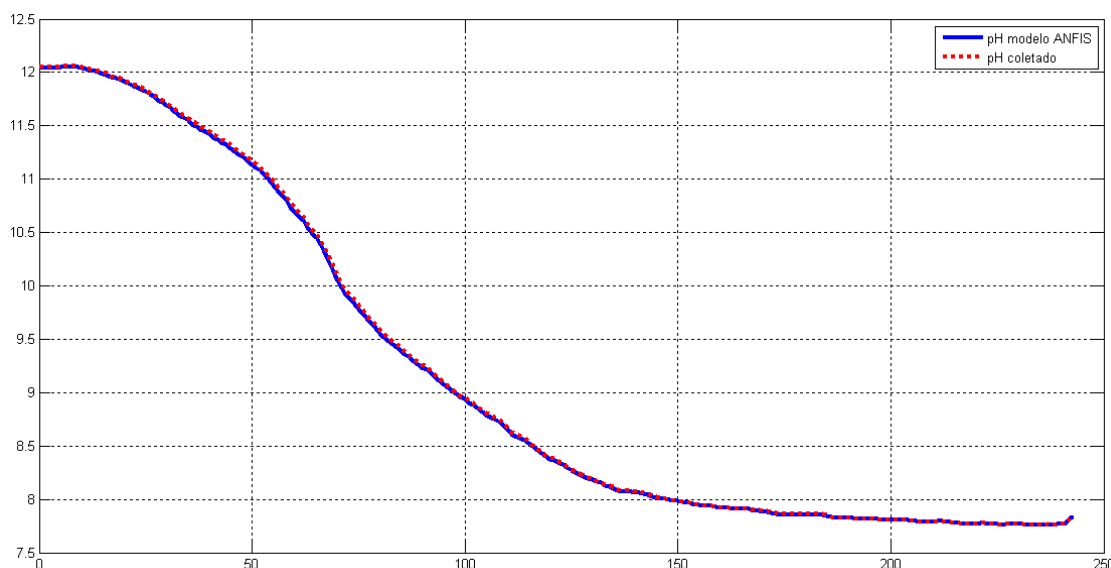


Figura 4.49 – Modelo ANFIS do pH coletado X pH modelado para um degrau na vazão de 0 L.min<sup>-1</sup> para 7,5L.min<sup>-1</sup> (*subtractive clustering*)

Observa-se que não houve melhora (o modelo utilizando 5 funções de pertinência apresenta o mesmo erro - praticamente sem alteração com relação ao modelo com 3 funções de pertinência triangulares utilizando tanto os algoritmos *grid partition* como *subtractive clustering*), apresentando o mesmo erro com uma quantidade maior de regras.

A tabela 4.11 mostra uma comparação entre as características de modelagem do sistema de Inferência *Fuzzy* Neuro-Adaptativo (ANFIS) utilizadas.

Tabela 4.11 – Comparação entre as metodologias de modelagem do sistema de Inferência *Fuzzy* Neuro-Adaptativo (ANFIS)

	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5
Dados de entrada para treinamento da rede	Vazão (L.min-1)	Vazão (L.min-1)	Vazão (L.min-1) + pH[k-1]	Vazão (L.min-1) + pH[k-1]	Vazão (L.min-1) + pH[k-1]
Dados de saída para treinamento da rede	pH	pH	pH	pH	pH
Número de funções de pertinência utilizadas	3	3	3	3	5
Erro - treinamento	1,6171	1,6115	0,0099	0,0092	0,0089
Quantidade de épocas para atingir o erro	10	10	4	1	1
Algoritmo - FIS	Grid Partition	Subtractive clustering	Grid Partition	Subtractive clustering	Grid Partition
Quantidade de regras	3 (inadequadas)	5 (inadequadas)	9	6	25
Erro - validação	1,6052	1,5618	0,011	0,011	0,011

Com o uso de apenas uma entrada (vazão) e uma saída (pH atual), não foi possível a obtenção de um modelo adequado (Análises 1 e 2 da Tabela 4.11). Sendo assim, foram utilizados mais parâmetros de entrada (mais informações) para o treinamento da rede. Utilizaram-se duas entradas - a saída atrasada em uma amostragem (pH [k-1]) e a vazão atual, e o pH atual - pH[k] - como saída para o treinamento da rede (Análises 3, 4 e 5 da Tabela 4.11). Com utilização de mais dados para o treinamento da rede, foram geradas regras de decisão mais adequadas e conseqüentemente o maior refinamento esperado, ou seja, a rede foi treinada com uma quantidade suficiente de parâmetros de entrada, obtendo-se modelos que identificam a dinâmica da alcalinidade (pH) da água empregada para remoção do detergente alcalino utilizado no processo de limpeza com a variação da vazão de forma adequada e muito melhores quando comparados aos métodos de modelagem aproximada.

O uso de funções de pertinência utilizando os algoritmos *grid partition* e *subtractive clustering* (comparação feita nas Análises 3 e 4 da Tabela 4.11), bem como o uso 3 e 5 funções de pertinência triangulares (comparação através feita nas Análises 3 e 5 da Tabela 4.11) não apresentaram grandes vantagens para a modelagem, pois o erro de treinamento foi atingido em uma quantidade pequena de épocas (4 épocas na Análise 3 e 1 época nas Análises 4 e 5) e o erro médio na validação do modelo foi o mesmo em todas – 0,011, sendo o grande diferencial o uso de mais parâmetros de entrada (duas entradas) para o treinamento da rede.



## CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES

Os objetivos deste trabalho foram atingidos com êxito. Para tal, foi implementada com sucesso a instrumentação utilizada em um processo de limpeza CIP típico que permitiu o monitoramento, controle e coleta adequada de dados.

Esperava-se uma influência tanto da vazão quanto da temperatura na remoção do detergente alcalino; porém a identificação da dinâmica do sistema a estímulos na vazão e/ou temperatura de operação do processo, usando o trocador de calor instalado mostrou - através da variação da alcalinidade (pH) da água empregada para remoção do detergente alcalino - que os parâmetros dinâmicos do sistema são fortemente influenciados pelas vazões e pouco afetados pelas temperaturas utilizadas, com maior contribuição para valores mais elevados de vazão ( $16 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ), onde há menor consumo de água.

A identificação aproximada da dinâmica da alcalinidade (pH) da água empregada para remoção do detergente alcalino utilizado no processo de limpeza com a variação da vazão utilizando os Métodos de Miller e Smith apresentaram um modelo (com erro) que representa a resposta do processo. Apesar disto, motivou-se o uso de uma metodologia de identificação mais refinada com o objetivo de comparação..

Isto foi possível através da *Toolbox Fuzzy*, do aplicativo SIMULINK / MATLAB®, com o sistema de Inferência *Fuzzy* Neuro-Adaptativo (ANFIS), sendo possibilitada a identificação adequada da dinâmica do processo de limpeza CIP na etapa de enxague.

A grande vantagem observada na utilização da modelagem utilizando o sistema ANFIS está na possibilidade da utilização de um aplicativo para gerar fácil e rapidamente o modelo independente da produção, condição de operação e equipamentos utilizados. Isto é possível através da modelagem aproximada utilizando os métodos de Miller e Smith, porém muito trabalhoso, pois se faz necessário recalcular os parâmetros que representam a dinâmica do processo para cada situação.

A tabela 4.11 do capítulo 4 (item 4.3.2.1.2) apresentou uma análise comparativa entre as características de modelagem do sistema de Inferência *Fuzzy* Neuro-

Adaptativo (ANFIS) utilizadas.

O principal diferencial observado foi a utilização de mais parâmetros de entrada (mais informações) para o treinamento da rede. Foram utilizadas duas entradas - a saída atrasada em uma amostragem ( $\text{pH}[k-1]$ ) e a vazão atual - e uma saída - o pH atual -  $\text{pH}[k]$  - para o treinamento da rede, obtendo-se um excelente modelo.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de sensor virtual baseado nos modelos obtidos para a variável de processo considerada neste trabalho revela uma perspectiva bastante atraente de aplicação industrial.

A previsão do comportamento dinâmico em tempo real do valor da variável de processo controlada contribuirá para um acompanhamento mais preciso da etapa de enxágue, gerando informações que poderão vir a ser utilizadas para a verificação “in-situ” do estado de calibração do elemento sensor empregado. Em muitas situações industriais, ocorre a perda gradual da calibração sem que a equipe responsável pela operação do sistema perceba.

Adicionalmente, o desenvolvimento de uma estratégia de controle otimizada, também baseada no sensor virtual, na qual a função objetivo a ser perseguida está relacionada à minimização dos custos também representa uma potencial aplicação na área de controle de processos industriais.

Os custos inerentes a um processo de limpeza CIP típico estão relacionados com o tempo de operação, com o volume de água gasto e com a vazão de operação da água de enxágue. Os modelos desenvolvidos neste trabalho poderiam ser usados para gerar o sinal realimentado de pH que, por sua vez, seriam empregados para calcular o set-point do controlador e indicador de vazão de água de enxágue. O set-point em questão seria calculado com base no desvio entre o pH gerado pelo modelo (“target”) e o pH medido, bem como no desvio entre o volume de água gasto efetivamente e o volume de água “target”.

A ideia principal neste caso seria o modelo obtido gerar as informações em tempo real que permitissem readequar a vazão de água utilizada, em resposta a flutuações nos valores medidos de vazão e/ou de eficiência de limpeza em relação ao processo em curso.

## 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 de junho de 2010.

AGUIRRE, L.A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais.** 554p., Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2000.

ANDRADE, N. J.; MACEDO, J. A. B. **Higienização na indústria de alimentos.** São Paulo: Livraria Varela, 1996. 182 p.

ASCII TABLE. **American Standard Code for Information Interchange.** Disponível em: <http://www.asciitable.com/>. Acesso em 17 de julho de 2010.

ÂSTRÖM, K. & HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning.** North Carolina, USA: ISA, 343 p., 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, abril 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.

BARRETO, M. J. **Introdução às Redes Neurais Artificiais.** Material de apoio. Florianópolis, 2002.

BENINI, L. C.; JUNIOR, M. M. **Modelagem Neuro-Fuzzy com apoio do Matlab.** Material de apoio. Presidente Prudente, 2008.

BENZECRY, M. A.; CAMEIRA, R. F.; KARRER, D.; VASQUES A. S. **Redes neurais artificiais: conceitos e aplicações.** IX Encontro de Engenharia de Produção da UFRJ, 2008.

BEUF, M.; RIZZO, G.; LEULIET, J. C., MÜLLER-STEINHAGEN, H.; YIANTSIOS, S.; KARABELAS, A.; BENEZECH, T. **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, p.66-68, v.12, 2003.

BORLAND, **Software Corporation.** Disponível em: <http://www.borland.com/br/products/delphi/>. Acesso em 28 de setembro de 2010.

BREMER, P. J. **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, 2005.

BREMER. **Bremer H. LTDA. - Flamo Tubular.** Disponível em: <http://www.bremer.com.br/novo/index.php?pg=hbfc>. Acesso em 09 de setembro de 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.

CHEN, X.D.; OZKANY, N.; QIN, F.; XIN, H.; LIN, L. **An effective CIP procedure for removing dairy protein based deposit – A Laboratory investigation.** In: Watkinson P.; Muller-Steinhagen, H.; Malayeri, R (editors). ECI Conference on heat exchanger fouling and cleaning fundamentals and applications, Santa Fe, New Mexico, paper 44, 07p. 2004.

COX, E. **Fuzzy fundamentals.** IEEE Spectrum, p. 58-61, 1992.

DELGADO, M.R.B S. **Projeto automático de sistemas nebulosos: uma abordagem co-evolutiva.** Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ENGINSTREL **Engematic Instrumentação Ltda.** Disponível em: <http://www.enginstrelengematic.com.br/boletins/Boletim%20621IP.pdf>. Acesso em 29 de junho de 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, 489 p., 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, maio 2006.

GALLOT-LAVALLEE, T.; LALANDE, M.; CORRIEU, G. **Cleaning kinetics modeling of holding tubes fouled during milk pasteurization.** Journal of Food Process Engineering, v. 7, p. 123-142, 1984.

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.; TAYLOR, J. H.; HALL, K. E.; HOLAH, J.T. **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.

GOMIDE, F. A. C; GUDWIN, R. R. **Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy.** SBA Controle & Automação No.4 n.03/setembro-outubro, 1994, PP 97-115.

GORMEZANO, L. **Desenvolvimento e implementação de sistema para avaliar a cinética de remoção de resíduos presentes nos tubos de trocador de calor feixe tubular.** Dissertação de Mestrado. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2007.

GRANT, C. S.; WEBB, G. E.; JEON, Y. W. **A noninvasive study of milk cleaning processes: calcium phosphate removal.** Journal of Food Engineering, v. 20, p. 197-230, 1997.

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

HARDWICK, W. A. **Handbook of Brewing.** New York, U.S.A.: Marcel Dekker Inc., 718p., 1995.

HOBBS, B. C.; ROBERTS, D. **Higiene y toxicología de los alimentos.** 3. ed. Zaragoza: Editorial Acribia, 478 p., 1997.

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

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

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

JANG, J.-S. **ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, N. 3, pp 665–685, 1993.

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.

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 - 06p.

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

LEE, C.C. **Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, part I and II.** IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, vol. 20, pp 404-435, 1990.

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.

MARRIOT, N. G. **Principles of Food Sanitation.** Springer Science + Business Media Inc, 416 p. New York-U.S.A., 1994.

MARSHALL, K. C. **Microbial adhesion in biotechnological processes.** Current Opinion in Biotechnology. v. 5, n. 3, Pages 296-301, Jun. 1994.

MARTIN, P. A. **Modelagem e controle de um trocador de calor feixe tubular.** Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

MELERO JUNIOR V. **Instrumentação e Identificação de um Processo de Sanitização Cinética CIP.** Dissertação de Mestrado. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2011.

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

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

MICRONAL. **Medição de pH.** Disponível em: [http://www.micronal.com.br/produtos/medidorph\\_B474.htm](http://www.micronal.com.br/produtos/medidorph_B474.htm). Acesso em 07 de maio 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.

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 20 de maio 2012.

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.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

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.

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, Paper Nº 933536, 1993.

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

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

ROCKWELL AUTOMATION. **Programmable Logic Controller - PLC.** Disponível em: [http://br.rockwellautomation.com/applications/gs/la/gsbr.nsf/pages/Home\\_Page\\_EN](http://br.rockwellautomation.com/applications/gs/la/gsbr.nsf/pages/Home_Page_EN). Acesso em 20 de maio de 2012.

SANDU, C., SINCH, R. K. **Energy increase in operation and cleaning due to heat-exchanger fouling in milk pasteurization.** Food Technology (Chicago) v. 45, p. 84-91, 1991.

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.

SHAW, I.S.; SIMÕES, M.G. **Controle e modelagem fuzzy.** São Paulo, Edgard Blucher. 165 p., 1999.

SILVA, C. A. U. **Um método para estimar observáveis GPS usando redes neurais artificiais.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.



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

TETRAPAK. **Pasteurização.** Disponível em: [http://www.tetrapak.com/br/produtos\\_e\\_servicos/processamento/bebidas/pasteurizacao/Pages/default.aspx](http://www.tetrapak.com/br/produtos_e_servicos/processamento/bebidas/pasteurizacao/Pages/default.aspx). Acesso em 20 de maio de 2012.

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

VAN ASSELT, 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.

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

VIEIRA, M. H. L. **Modelagem de um sistema de controle por lógica difusa empregado na secagem por atomização de produtos cerâmicos.** 193 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

WEATHEFORD. **Pump and Fluid Systems.** Disponível em: <http://www.weatherford.com/Products/Production/PumpandFluidSystems>. Acesso em 09 de setembro de 2010.

WONG, A. C. L. **Biofilms in food processing environments.** Journal of Dairy Science, v.81, p. 2765-2770, out. 1998.

ZADEH, L. **Fuzzy Sets - Information and Control**, vol. 8, pp 338-353, 1965.

ZADEH, L. **Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes.** IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics, vol SMC3, pp 28-44, 1973.

ZHUI, Y. **Multivariable system identification for process control.** Elsevier Science & Technology Books, Out. 2001.

# APÊNDICE A - Esquema elétrico das conexões do inversor de frequência

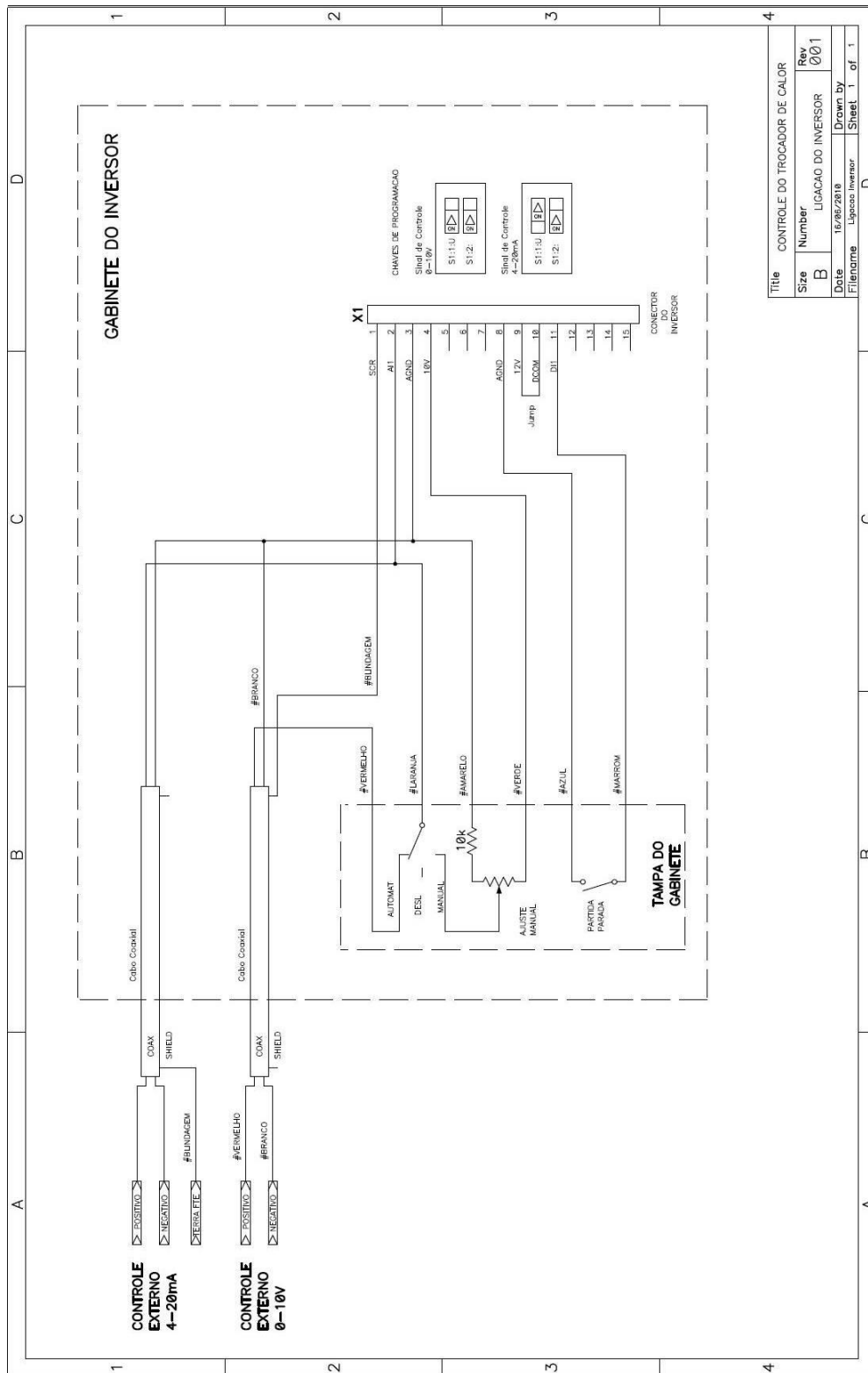


Figura A.1 – Esquema elétrico das conexões do inversor de frequência

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

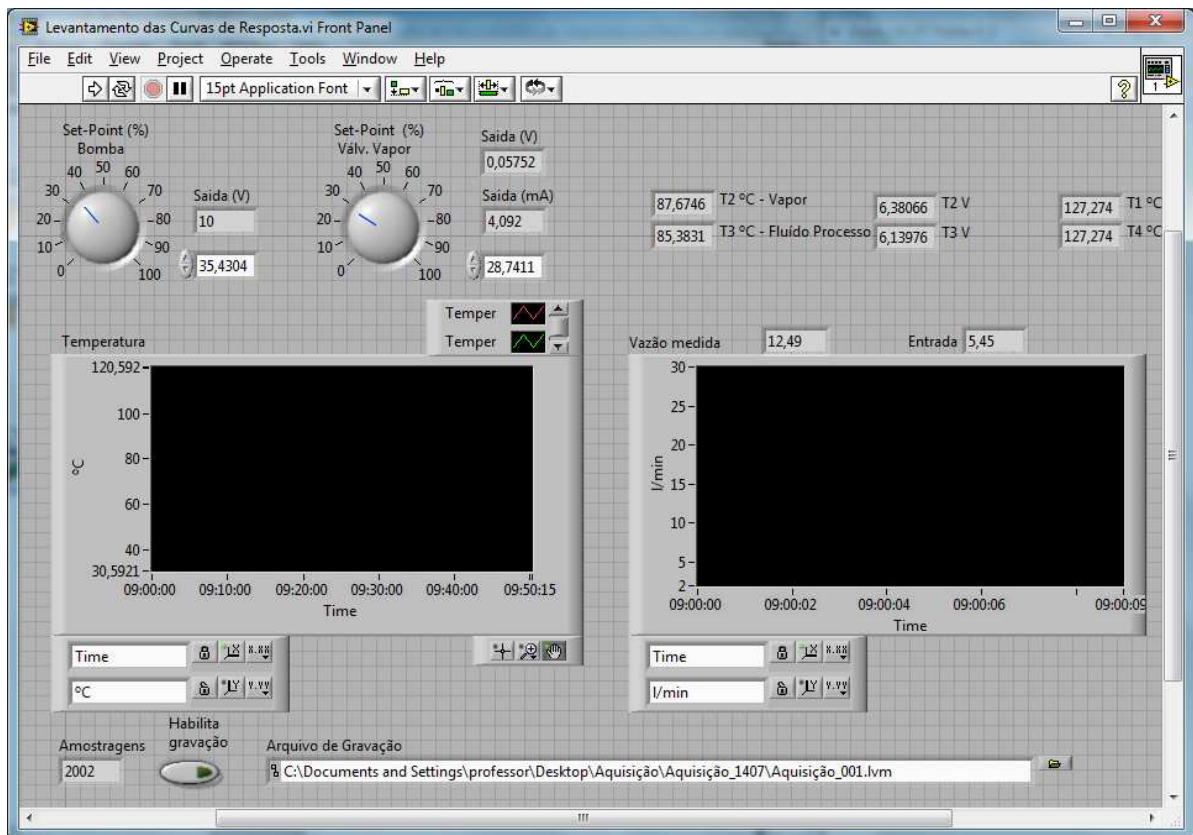


Figura B.1 – Painel Frontal do programa para coleta de dados em LabVIEW

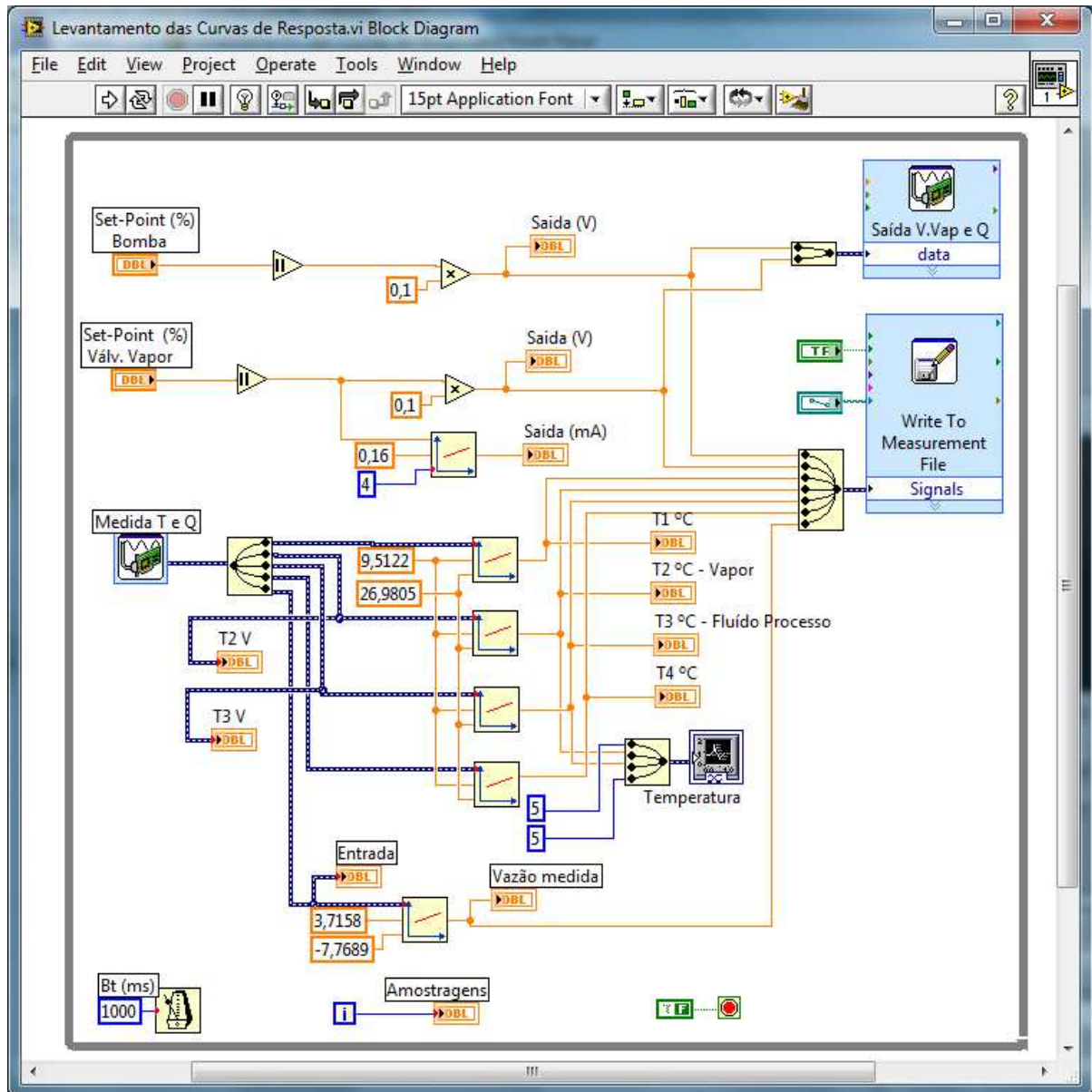


Figura B.2 – Diagrama em blocos do programa para coleta de dados em LabVIEW®

## APÊNDICE C - Painel frontal e diagrama em blocos do programa dos controladores e obtenção de valores de pH em plataforma LabVIEW®

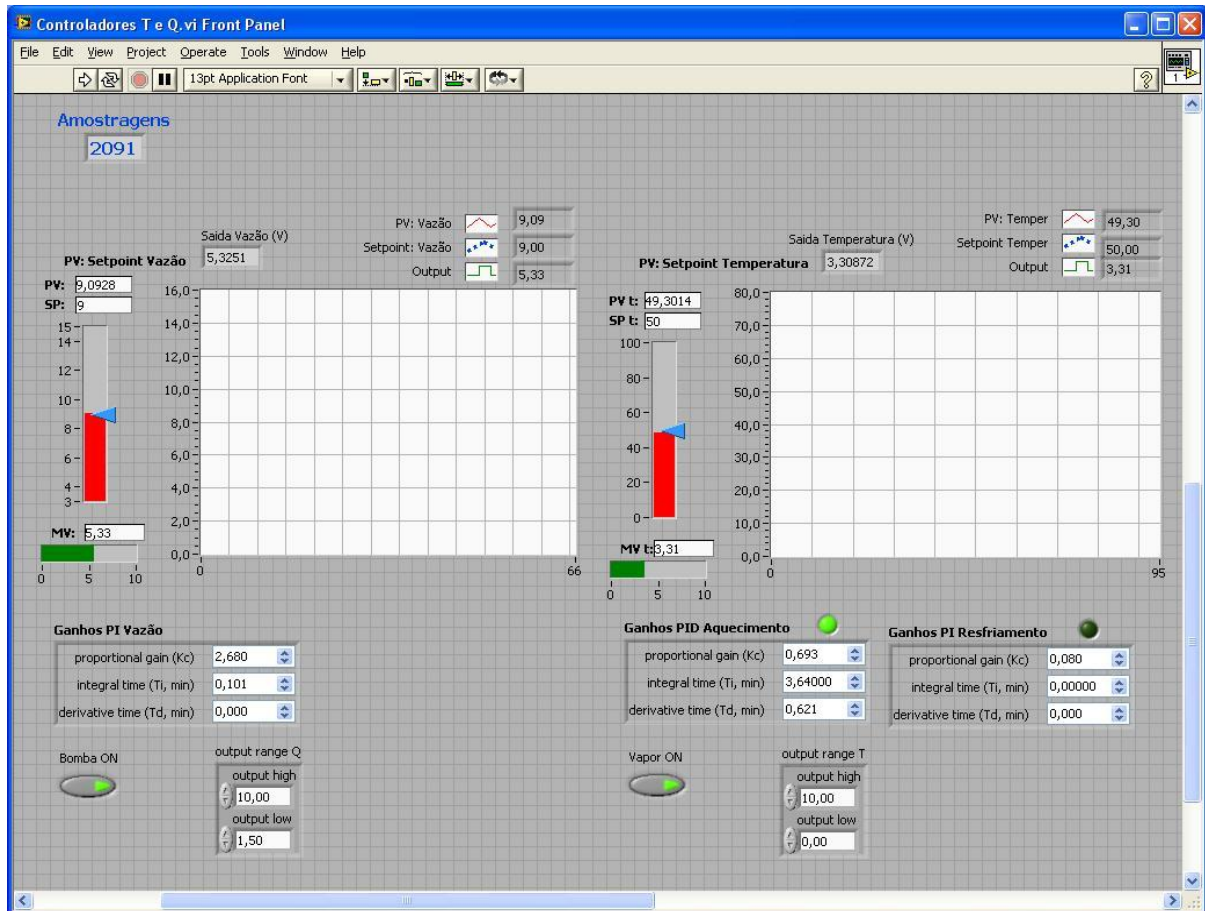


Figura C.1 – Painel frontal dos controladores: aquisição da vazão, temperaturas e pH usando LabVIEW®

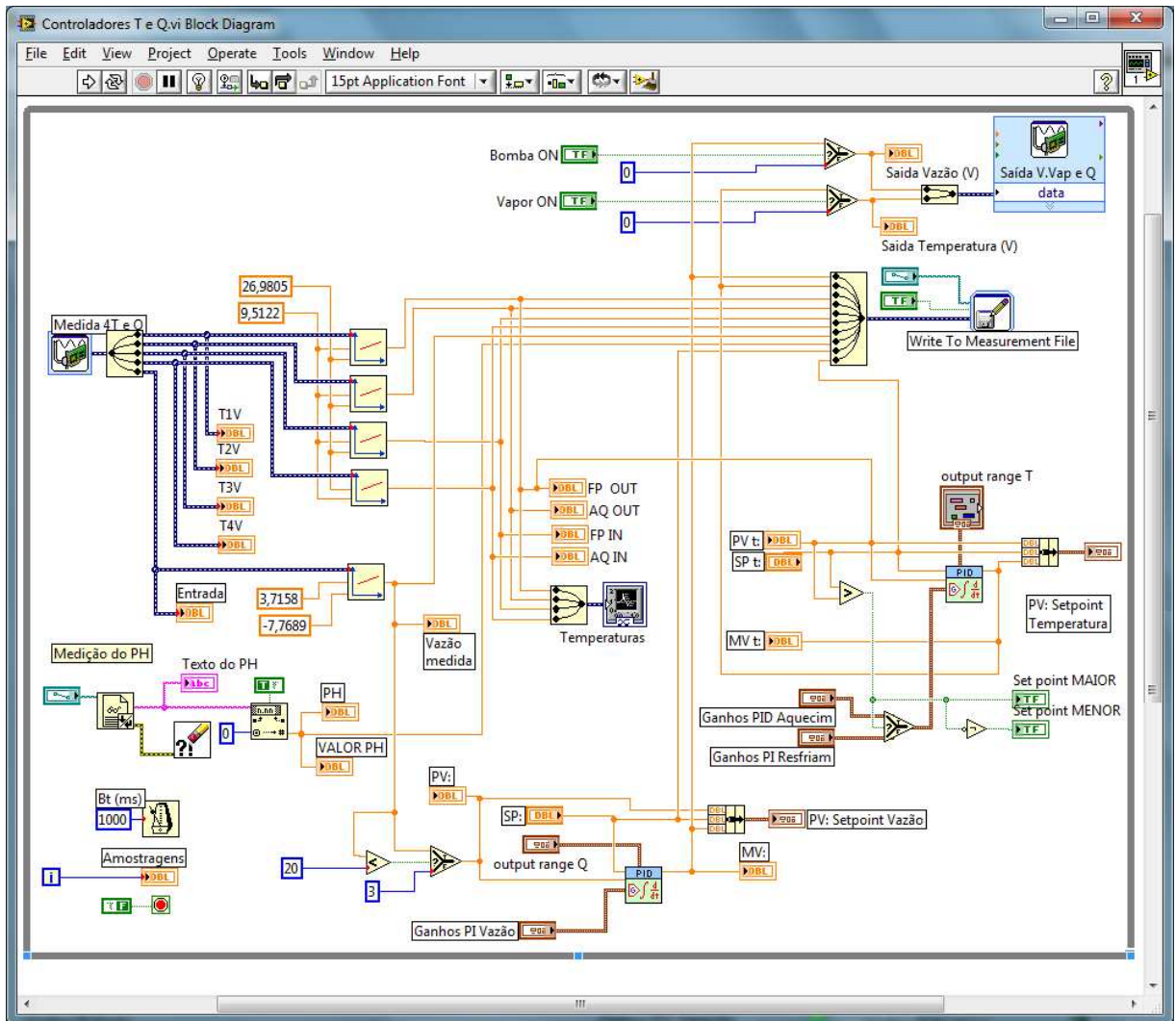


Figura C.2 – Diagrama em blocos dos controladores: aquisição da vazão, temperaturas e pH usando LabVIEW®