

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE EM UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA**

Selma Parreira Capanema

Belo Horizonte, 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE EM UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação submetida à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais para preenchimento dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Discente: Selma Parreira Capanema
Orientador: Prof. Dr. Walmir Matos Caminhas

Belo Horizonte, 2004

Agradecimentos

À Deus

Ao Prof. Walmir Matos Caminhas, pela confiança, empenho, ensinamentos e idéias. Mais que um orientador, um amigo.

À COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais, na pessoa do Engenheiro Max Demattos, por oferecer toda a infra-estrutura ao nosso trabalho.

Aos técnicos da COPASA : Ademir, Agnaldo, Carlos, Cláudio, Dimas, Dinilson, Ferreira, Gláucio, Hudson, Jamir, Neider, Renato, Sidnei, Vander e Wagner pelo grande trabalho de campo e laboratório, paciência e brincadeiras, sem os quais nosso trabalho se tornaria inviável.

Aos diversos fabricantes de instrumentação analítica pela confiança e presteza em disponibilizar os instrumentos.

Aos alunos do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Marcos Vinícius e Crysthiane, pela ajuda na elaboração dos programas e na incansável tarefa de procurar extrair dos dados a melhor solução para o nosso trabalho.

Ao Engenheiro Kleber Rocha por ter acreditado em nossa idéia e possibilitado que se tornasse realidade.

Ofereço esse trabalho aos meus filhos, Aline e Guilherme, pelo carinho, paciência, apoio e confiança, nos momentos mais importantes de minha vida.

Epígrafe

Resumo

Esse trabalho apresenta o estudo desenvolvido na Estação de Tratamento de Água do Rio das Velhas – ETA, de propriedade da COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Nova Lima, Região Metropolitana de Belo Horizonte) durante o período de julho de 2002 a junho de 2004, para avaliar a utilização de instrumentação analítica para fins de controle do processo de coagulação e desenvolver modelos que, associados à técnicas de controle, possam ser utilizados para se efetuar o controle automático da dosagem de coagulante. Para tanto, foram feitos contratos de parceria com fabricantes tradicionais de instrumentação analítica aplicada à área de saneamento e realizadas análises comparativas da resposta dos diversos instrumentos.

Definidos os instrumentos mais adequados para a qualidade da água do Rio das Velhas, foi construída uma base de dados que possibilitou, utilizando métodos não paramétricos, através de gráficos de correlação cruzada, avaliar a relação entre as variáveis do processo. A partir do resultado desta análise, dos métodos operacionais adotados na ETA e referências bibliográficas foi feita a identificação das variáveis mais relevantes para desenvolvimento dos modelos.

Foram identificadas como variáveis que influenciam o processo de coagulação a vazão de água afluente à ETA (água bruta), a turbidez e a cor verdadeira da água bruta e o pH de coagulação. Outras variáveis foram avaliadas tais como condutividade e temperatura da água bruta e tipo de coagulante. A condutividade apresentou uma estreita faixa de variação, entre 32 e 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e também baixa correlação com as demais variáveis. O tipo de coagulante não foi alterado durante o período que esse trabalho foi desenvolvido, estando as alterações

vinculadas à contratos de fornecimento feitos pela COPASA. Na ETA são utilizados sais a base de ferro (cloreto férrico ou sulfato ferroso clorado). Durante o período de construção da base de dados, foi feito uso de sulfato ferroso clorado na concentração de 17,5 mg/L Fe_2O_3 e densidade de 1,5 g/L. A temperatura da água bruta se manteve praticamente constante, com valor médio de 22 °C.

Definidas as variáveis, foram desenvolvidos vários modelos utilizando-se topologias diferentes de Redes Neurais Artificiais, com o objetivo de se obter um modelo para representar o comportamento do operador ao controlar a dosagem de coagulante e um modelo para efetuar a predição da turbidez da água decantada.

Inicialmente, foram desenvolvidos vários modelos para efetuar a predição da turbidez da água decantada, utilizando o MATLAB. Esses modelos foram implementados em um programa em linguagem de programação C++. Utilizando os recursos de automação disponíveis na ETA, o programa foi conectado à um supervisor, tornando possível a aquisição dos valores das variáveis de entrada e o registro gráfico da saída de cada um dos modelos “on line”.

Para identificar o comportamento do operador efetuou-se procedimento semelhante àquele para a predição da turbidez da água decantada.

Esses programas podem, atualmente, ser utilizados pelo operador para nortear suas ações, ao ajustar a dosagem de coagulante, compensando o tempo morto da planta, através da predição da turbidez da água decantada.

Abstract

Capanema, S. P. *Instrumentação e Controle do Processo de Coagulação em uma Estação de Tratamento de Água*. Belo Horizonte, 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

That work presents the study developed in the Station of Treatment of Water of Rio of the Old ones- ETA, of property of COPASA- Company of Sanitation of Minas Gerais (New Lima, Metropolitan Area of Belo Horizonte) during the period of July of 2002 to June of 2004, to evaluate the use of analytical instrumentation for ends of control of the coagulation process and to develop models that, associates to control techniques, they can be used to make the automatic control of the dosage of clotting. For so much, they were made partnership contracts with traditional manufacturers of applied analytical instrumentation to the area of sanitation and accomplished comparative analyses of the answer of the several instruments.

Defined the most appropriate instruments for the quality of the water of Rio of the Old ones, it was built a database that made possible, using methods no parametric, through graphs of crossed correlation, to evaluate the relationship among the variables of the process. Starting from the result of this analysis, of the operational methods adopted in ETA and bibliographical references was done the identification of the most relevant variables for development of the models.

They were identified as variables that influence the coagulation process the flow of water flowing to ETA (rude water), the turbidity and the true color of the rude water and the coagulation pH. Another varied were appraised such as conductivity and temperature of the rude water and type of clotting. The conductivity presented a narrow variation strip, between 32 and 40 mS/cm, and also low correlation with the other variables. The coagulant type was not altered during the period that that work was developed, being the alterations linked to supply contracts done by COPASA. In ETA salts are used the base of iron (ferric chloride or

chlorinated ferrous sulfate). During the period of construction of the database, it was made use of ferrous sulfate chlorinated in the concentration of 17,5 mg/L Fe₂O₃ and density of 1,5 g/L. the temperature of the rude water stayed practically constant, with medium value of 22 °C.

Defined the variables, several models were developed being used topologies different from Artificial neural networks, with the objective of obtaining a model to represent the behavior of the operator when controlling the coagulant dosage and a model to make the prediction of the turbidity of the decanted water.

Initially, several models were developed to make the prediction of the turbidity of the decanted water, using MATLAB. Those models were implemented in a program in programming language C++. Using the available automation resources in ETA, the program was connected to a supervisório, turning possible the acquisition of the values of the entrance variables and the graphic registration of the exit of each one of the models “on line.”

To identify the operator's behavior he/she occurred procedure similar to that for the prediction of the turbidity of the decanted water.

Those programs can, now, to be used by the operator to orientate their actions, when adjusting the coagulant dosage, compensating the time killed of the plant, through the prediction of the turbidity of the decanted water.

Sumário

Capítulo 1

Introdução	11
1.1 O processo de coagulação nos sistemas de tratamento de água	11
1.2 Motivação do trabalho	12
1.3 Objetivos	14
1.4 O estado da arte no controle da dosagem de coagulante em ETAs convencionais	16
1.5 Visão geral do trabalho	18

Capítulo 2

Características das Águas Naturais e dos Sistemas de Inferência Nebulosos Neuroadaptativos	19
2.1 Introdução	19
2.2 Poluentes da água	20
2.3 O estado coloidal	21
2.3.1 Propriedades molecular e cinética de sistemas coloidais	22
2.3.2 Propriedades ópticas de sistemas coloidais	23
2.3.3 Estrutura de uma partícula coloidal - A dupla camada elétrica	24
2.3.4 Estabilidade eletrostática	26
2.4 Principais propriedades físicas da água	28
2.4.1 Cor	28
2.4.2 Turbidez	29
2.4.3 pH	32
2.4.4 Condutividade	35
2.5 O processo de coagulação	37
2.6 Mecanismos de coagulação	38
2.6.1 Compressão da camada difusa	38
2.6.2 Adsorção e neutralização de cargas	38
2.6.3 Varredura	39
2.6.4 Adsorção e formação de pontes	39
2.7 Sistemas de Inferência Nebulosos Neuroadaptativos (ANFIS)	38

Capítulo 3

Instrumentação Analítica para Medição das Características da Água e Sistema para Aquisição de Dados	40
3.1 Introdução	40
3.2 Análise de turbidez	41
3.2.1 Análise de altos valores de turbidez	41
3.2.2 Análise de baixos valores de turbidez	45
3.3 Análise de pH	48
3.4 Análise de condutividade	50
3.5 Análise de cor	51
3.6 Medição de vazão de água bruta	52

3.7	Sistema de aquisição e armazenamento de dados	55
3.7.1	Extração das tags dos arquivos gerados pelo sistema supervisorio	56
3.7.2	Sincronização e organização dos dados	57

Capítulo 4

	Metodologia Utilizada para Desenvolvimento do Trabalho	60
4.1	Introdução	60
4.2	Preparação dos dados	60
4.3	Identificação e eliminação de erros grosseiros nos dados	63
4.4	Correlação das variáveis para determinação dos parâmetros que serão utilizados como entradas das redes neurais	67
4.5	Análise de correlação para as variáveis de entrada do modelo para identificação do comportamento do operador	70
4.6	Análise de correlação para as variáveis de entrada do modelo para predição da turbidez da água decantada	72
4.7	Modelagem	73
4.8	Remodelagem do sistema para predição da turbidez da água decantada	75
4.9	Modelagem do sistema para identificação do comportamento do operador	77

Capítulo 5

	Apresentação dos Resultados	81
5.1	Introdução	81
5.2	Predição da Turbidez da Água Decantada - Resultados de Campo.....	85
5.3	Identificação do Comportamento do Operador - Resultados de Campo	88

Capítulo 6

	Conclusões	88
	Referências Bibliográficas	91

Lista de Figuras

FIGURA 1.1: FOTO EVIDENCIANDO LANÇAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO E INDUSTRIAL NO RIO DAS VELHAS.....	13
FIGURA 1.2: FOTO AÉREA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO RIO DAS VELHAS	14
FIGURA 2.1: EQUILÍBRIO DA SEDIMENTAÇÃO [48]	23
FIGURA 2.2: EFEITO TYNDALL [48]	24
FIGURA 2.3: REPRESENTAÇÃO DO COLÓIDE [42]	26
FIGURA 2.4: MEDIÇÃO DA ATENUAÇÃO E DISPERSÃO DA RADIAÇÃO TRANSMITIDA [30].....	31
FIGURA 2.5: EIS = POTENCIAL NO PONTO ISOPOTENCIAL	34
FIGURA 2.6: TOPOLOGIA DA REDE ANFIS	96
FIGURA 3.1: ANALISADORES DE TURBIDEZ - ÁGUA BRUTA.....	42
FIGURA 3.2: SÉRIE HISTÓRICA TEMPORAL - ANALISADORES DE TURBIDEZ - ÁGUA BRUTA	43
FIGURA 3.3: SÉRIE HISTÓRICA TEMPORAL - ANALISADORES DE TURBIDEZ - ÁGUA BRUTA - ZOOM	43
FIGURA 3.4: SÉRIE HISTÓRICA TEMPORAL - ANALISADORES DE TURBIDEZ - ÁGUA DECANTADA.....	47
FIGURA 3.5: SÉRIE HISTÓRICA TEMPORAL - ANALISADORES DE TURBIDEZ - ÁGUA DECANTADA - ZOOM	47
FIGURA 3.6: SÉRIE HISTÓRICA TEMPORAL - ANALISADORES DE TURBIDEZ - ÁGUA TRATADA / VAZÃO ÁGUA BRUTA.....	48
FIGURA 3.7: ANALISADORES DE pH - ÁGUA COAGULADA	49
FIGURA 3.8: SÉRIE HISTÓRICA TEMPORAL - ANALISADORES DE pH - ÁGUA COAGULADA.....	49
FIGURA 3.9: SÉRIE HISTÓRICA TEMPORAL - ANALISADORES DE pH - ÁGUA COAGULADA - ZOOM	50
FIGURA 3.10: ANALISADOR DE CONDUTIVIDADE - ÁGUA BRUTA.....	50
FIGURA 3.11: SÉRIE HISTÓRICA TEMPORAL - ANALISADOR DE CONDUTIVIDADE - ÁGUA BRUTA	51
FIGURA 3.12: HISTOGRAMA DE VAZÃO DE ÁGUA BRUTA	54
FIGURA 3.13: ÁRVORE BINÁRIA	58
FIGURA 4.1: IDENTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO OPERADOR.....	61
FIGURA 4.2: PREDIÇÃO DA TURBIDEZ DA ÁGUA DECANTADA	62
FIGURA 4.3: VALIDAÇÃO DE DADOS - TURBIDEZ DA ÁGUA BRUTA.....	64
FIGURA 4.4: VALIDAÇÃO DE DADOS - pH DE COAGULAÇÃO	65
FIGURA 4.5: VALIDAÇÃO DE DADOS - CONDUTIVIDADE.....	65
FIGURA 4.6: VALIDAÇÃO DE DADOS - VAZÃO ÁGUA BRUTA	66
FIGURA 4.7: VALIDAÇÃO DE DADOS - DOSAGEM	66
FIGURA 4.8: VALIDAÇÃO DE DADOS - TURBIDEZ ÁGUA DECANTADA.....	67
FIGURA 4.9: CORRELAÇÃO CRUZADA DE UM SINAL ALEATÓRIO COM ELE MESMO ATRASADO DE 5 AMOSTRAS.....	68
FIGURA 4.10: CORRELAÇÃO CRUZADA DA DOSAGEM COM AS VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	71
FIGURA 4.11: CORRELAÇÃO CRUZADA DA TURBIDEZ DA ÁGUA DECANTADA COM AS OUTRAS VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	73
FIGURA 4.12: VALIDAÇÃO DO MODELO PARA PREDIÇÃO DA TURBIDEZ DA ÁGUA DECANTADA	76
FIGURA 4.13: VALIDAÇÃO DO MODELO – HISTOGRAMA DO ERRO ENTRE A SAÍDA REAL E A PREDIÇÃO	77
FIGURA 4.14: RESULTADOS DO TREINAMENTO PARA IDENTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO OPERADOR.....	78
FIGURA 4.15: VALIDAÇÃO DO MODELO PARA IDENTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO OPERADOR.....	79
FIGURA 4.16: VALIDAÇÃO DO MODELO – HISTOGRAMA DE ERRO	79
FIGURA 5.1: REGISTRO DE TENDÊNCIA HISTÓRICA APRESENTADO PARA O OPERADOR	81
FIGURA 5.2: RESULTADOS DE CAMPO – PERÍODO 26 DE FEVEREIRO À 3 DE MARÇO DE 2004	83
FIGURA 5.3: RESULTADOS DE CAMPO – PERÍODO 26 DE FEVEREIRO À 3 DE MARÇO DE 2004 - ZOOM	84
FIGURA 5.4: CORRELAÇÃO ENTRE PREDIÇÃO ATRASADA DE 14 AMOSTRAS E TURBIDEZ REAL.....	85
FIGURA 5.5: PROGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DE COAGULANTE – INTERFACE COM O OPERADOR .	86
FIGURA 5.6: IDENTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO OPERADOR – RESULTADOS DE CAMPO.....	87

Capítulo 1

Introdução

1.1 O processo de coagulação nos sistemas de tratamento de água

A coagulação é um dos processos fundamentais nos Sistemas de Tratamento de Águas Superficiais para fins de abastecimento público. Exceto nas unidades de filtração “lenta”, a coagulação é responsável pela clarificação das águas, pela remoção da maioria dos metais pesados, além de agentes químicos e microbiológicos.

Os agentes presentes nas águas, que devem ser removidos ou minimizados, para fins de consumo humano, basicamente são: argilas, silicatos, íons metálicos, microorganismos (bactérias, protozoários, vírus, algas e fungos) que sobre o aspecto elétrico, na grande maioria apresentam carga elétrica negativa. Este fato, associado ao minúsculo tamanho desses agentes, dificulta a remoção por sedimentação natural ou simples filtração.

Para remoção destas impurezas são utilizados produtos coagulantes cujas principais características são:

- são solúveis em água;
- fornecem carga elétrica positiva;
- reagem quimicamente com a água (hidrólise), formando complexos ou precipitados químicos.

Os coagulantes podem ser utilizados objetivando o “cobrimento” de partículas de carga elétrica negativa com positiva (neutralização/adsorção) seguido de filtração direta, ou a

formação de precipitado químico (varredura), onde ocorre a aglutinação de partículas também de carga elétrica negativa, seguida de remoção por sedimentação.

1.2 Motivação do trabalho

Devido a relevância do processo de coagulação, a aplicação dos produtos coagulantes na água a ser tratada (água bruta), requer critérios e cuidados que objetivem a sua melhor performance.

Tanto a sub quanto a sobre dosagem do coagulante podem comprometer a qualidade da água tratada, ocasionando a desconformidade com os requisitos preconizados pelo Padrão de Potabilidade – Portaria: 1469/2000 do Ministério da Saúde e/ou sobrecarregar as etapas subsequentes do Sistema de Tratamento, podendo levar a aumento dos custos operacionais, por exemplo, com o aumento do consumo de água tratada utilizada para lavagem dos filtros.

Portanto, um bom controle do processo de coagulação pode reduzir custos operacionais, gastos com produtos químicos e garantir a conformidade com o Padrão de Potabilidade vigente.

No Brasil, a maioria das ETA's fazem o controle do processo de coagulação, utilizando-se principalmente dos ensaios de coagulação realizados através de aparelhos denominados "Jar-Test". Recentemente, em algumas ETA's vem sendo implementado controle automático utilizando-se, principalmente, detectores de fluxo de corrente elétrica.

Considerando-se que:

- a qualidade da água bruta varia com as estações do ano e com a fonte de captação;
- a dosagem de coagulante está correlacionada não linearmente com os parâmetros que definem a qualidade da água bruta tais como turbidez, pH, cor, condutividade, temperatura, etc., e especificamente à turbidez, as relações não são conhecidas em detalhes;
- a determinação da quantidade de coagulante não pode ser calculada facilmente;
- os valores dos parâmetros de qualidade de água bruta variam em uma larga faixa e não podem ser controlados, estando sujeitos a variações atípicas devidas, por exemplo, a

poluição, reversões térmicas, no caso de lagos, etc.;

- falhas não são permitidas, pois o produto da planta a ser controlada é a água para consumo humano;
- a aplicação das técnicas de controle utilizadas atualmente implica em algumas limitações operacionais,

surgiu a motivação para desenvolvimento deste trabalho, que fará uso de técnicas de controle inteligente para identificação e predição. Os resultados obtidos poderão ser utilizados para funções de controle automático do processo de coagulação e também para validação e reconstrução de dados.

A ETA, cuja base de dados foi utilizada nesta dissertação, é a Estação de Tratamento de Água do Rio das Velhas, com capacidade de tratamento de 6.750 litros por segundo. A montante da captação, o Rio das Velhas recebe despejo de esgoto doméstico e industrial e, sendo a captação feita através de barragem submersa, a ETA fica exposta a variações significativas na qualidade da água afluente.



FIGURA 1.1: Foto evidenciando lançamento de esgoto doméstico e industrial no Rio das Velhas

Esta ETA é operada pela COPASA há aproximadamente 30 anos, o que garante um conhecimento muito bom das características típicas da água bruta ao longo do ano. Foram realizados ensaios de “jar teste” para as diversas qualidades de água bruta que ocorrem durante o ano e os resultados destes ensaios são utilizados como referência para a operação da

ETA. A qualidade da água tratada atende aos requisitos estabelecidos pela Portaria: 1469/2000 do Ministério da Saúde. Tais fatos nos permitem utilizar o comportamento atual dos operadores como base para o desenvolvimento do modelo proposto nesta dissertação.



FIGURA 1.2: Foto aérea da Estação de Tratamento de Água do Rio das Velhas

1.3 Objetivos

Esta dissertação objetiva desenvolver uma metodologia para identificar o comportamento do operador humano ao efetuar o controle da dosagem de coagulante e uma metodologia de predição para se avaliar a eficiência da coagulação, baseado nas características da água bruta e decantada e na respectiva dosagem de coagulante, utilizando dados históricos coletados durante o período de janeiro de 2003 à fevereiro de 2004.

Considerando que:

- a modelagem da planta por identificação de sistema somente poderia ser feita com o sistema de coagulação em malha fechada, pois a planta alvo deste trabalho se encontra operando continuamente e abastecendo uma população de aproximadamente 2.200.000 habitantes;
- a complexidade de se isolar o modelo da planta do modelo do controlador, neste caso representado pelo operador;
- a complexidade do processo, onde o entendimento dos fenômenos químicos não são

bem compreendidos, optou-se por efetuar a identificação do comportamento do operador humano, cujo modelo poderá ser utilizado em uma malha de controle, sem necessidade de se efetuar a modelagem da planta.

Considerando o processo de coagulação, o modelo do comportamento do operador combinado àquele de predição da turbidez da água decantada poderá ser incorporado à técnicas de controle, para prover uma estratégia de controle automático da dosagem de coagulante, efetuando-se também a validação e reconstrução de sinais provenientes dos instrumentos de campo.

Ao fazer uso de redes neurais e lógica fuzzy, este trabalho é inovador pois, não há registro da utilização de tais técnicas aplicadas ao processo de coagulação no Brasil. Desta maneira, além de contribuir para o desenvolvimento tecnológico do setor de saneamento, este trabalho possibilita abrir uma frente de pesquisa acadêmica para aplicação de técnicas modernas de modelagem e controle ao saneamento.

O trabalho é constituído das etapas:

- revisão bibliográfica sobre as características das águas naturais, do processo de coagulação e das técnicas de controle inteligente;
- instalação e avaliação da resposta dos instrumentos analíticos utilizados para o sensoramento dos parâmetros que caracterizam a água;
- avaliação das características dos dados de entrada dos sistemas de identificação e predição;
- criação de uma base de dados representativa do período completo referente ao ciclo da água;
- estudo da metodologia de modelagem neurofuzzy e de técnicas de validação de dados, e desenvolvimento da estrutura dos sistemas de identificação e predição;
- projeto dos sistemas de identificação do comportamento do operador e predição da turbidez da água decantada, usando dados do sistema real;
- desenvolvimento dos programas necessários para implantação dos modelos;
- análise dos resultados.

1.4 O estado da arte no controle da dosagem de coagulante em ETAs convencionais

O método tradicional de controlar a dosagem de coagulante depende de intervenções manuais feitas por operadores nas ETAs. Este método consiste na realização de ensaios em aparelho de "Jar-Test" e compreende a coleta de amostras de água bruta, a adição de diferentes quantidades de coagulante em cada amostra, a simulação das condições hidráulicas da ETA, através da reprodução no aparelho, dos gradientes de velocidade, tempos de detenção, velocidade de sedimentação, etc.. Após um período de tempo determinado, é feito o descarte do material sedimentado e em seguida cada amostra é avaliada verificando-se os parâmetros que definem a qualidade da água. Este procedimento é repetido para a mesma água, fazendo-se a adição de alcalinizante para as mesmas dosagens de coagulante anteriores. Determina-se desta maneira a dosagem mais conveniente de coagulante e o respectivo pH de coagulação. Esta dosagem é utilizada como set point. A dosagem é alterada mediante a realização de um novo "Jar-Test", caso a qualidade da água tratada varie. Desvantagens associadas a este método são a necessidade de intervenções manuais constantes e, também, a limitação para se prover a realimentação ao sistema de dosagem. As análises de água tratada e as análises da água nos subprocessos intermediários, em um planta de tratamento de água, são feitas de acordo com critérios operacionais e com a necessidade percebida pelo operador. Portanto, as correções nas dosagens estarão vinculadas à realização destas análises e a experiência do operador, para identificar variações que demandem necessidade de realização de análises. Na prática, nas ETAs onde o controle da dosagem de coagulante é manual, são construídos os diagramas de coagulação. Isto garante o conhecimento da quantidade de coagulante a ser dosado, para a água afluyente com características típicas. Entretanto, as ETAs estão sujeitas a mudanças não previsíveis nas características da água bruta, devido a influências do ambiente externo. Neste caso, a experiência do operador é o item de maior relevância para se atender aos requisitos de qualidade, preconizados pelo Padrão de Potabilidade – Portaria: 1469/2000 do Ministério da Saúde.

Um outro método que vem sendo utilizado, principalmente em ETAs de pequeno porte, onde a captação garante qualidade de água típica, com faixa de variação dos parâmetros da água bruta relativamente estreita ao longo da maior parte do ano, é um método de controle

automático e faz uso de um instrumento denominado Detector de Fluxo de Corrente. Este instrumento mede a carga elétrica residual líquida proveniente da turbidez na água. O local onde é feita a coleta da amostra, a ser apresentada ao instrumento, deve estar após o ponto de aplicação de coagulante, em um local onde seja garantida a homogeneidade da mistura da massa líquida. É necessário fornecer ao instrumento um ponto de referência que representa um padrão de qualidade de água coagulada ótimo. Este ponto de referência é obtido a partir da realização de "Jar-Test" e é utilizado para ajuste do zero do instrumento. Valores de fluxo de corrente acima do ponto de referência indicam que há excesso de coagulante e valores abaixo indicam uma dosagem insuficiente. A partir da referência fornecida ao instrumento, cria-se uma "janela de operação" na qual ele consegue visualizar alterações na qualidade da água bruta. Variações de qualidade de água muito grandes com relação à referência, limitam a operação do instrumento pois, o mesmo satura. Portanto, a principal desvantagem associada a utilização destes instrumentos é a sua falta de adaptação a todos os tipos de água bruta [14].

As estratégias de controle inteligente, implementadas por lógica fuzzy e redes neurais artificiais aplicadas ao processo de coagulação, já vem sendo utilizadas em alguns países tais como França e Reino Unido, a partir da segunda metade da década de 90, devido justamente à habilidade das redes neurais de capturar, muito eficientemente, informações não lineares, a sua capacidade de acomodar sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas e a possibilidade de se ter um modelo com bom desempenho, quando sujeito a mudanças nas variáveis de entrada e saída. Para identificar o comportamento do operador humano implementações por lógica fuzzy têm sido utilizadas na indústria em geral.

Neste caso as metodologias de modelagem utilizando redes neurais ou lógica fuzzy fornecem apenas um modelo, o qual deve ser incorporado à alguma outra técnica para implantação de uma estratégia de controle.

O surgimento dos analisadores em linha, contribuiu fortemente para a implantação de sistemas de controle automáticos no setor de saneamento. Análises que antes eram restritas a laboratórios e feitas em intervalos de tempo relativamente longos, passaram a ser feitas em linha com taxas de amostragem da ordem de minuto. Entretanto, estes instrumentos, ainda hoje, apresentam deficiências que podem comprometer a eficiência e a robustez da operação de ETAs. As redes neurais e as técnicas de processamento de sinais, neste caso, têm sido

utilizadas para se obter melhoria na confiabilidade de sistemas de medição, fazendo-se a predição de um parâmetro de qualidade de água baseado em outros ou em si mesmo em intervalos de tempo atrasados, para se reconstruir um dado ou retirando ruídos oriundos dos sistemas de medição [13], [17].

No Brasil não se tem conhecimento, até o momento, de nenhum processo de coagulação automatizado, utilizando estratégias de controle inteligente baseadas em redes neurais artificiais e lógica fuzzy, apesar de serem inúmeras as possibilidades para aplicação desta técnica.

1.5 Visão geral do trabalho

O presente trabalho está organizado em 6 capítulos.

O capítulo 2 descreve as características das águas naturais e o processo de coagulação. São apresentados os principais poluentes. É feita uma análise mais detalhada das impurezas em estado coloidal pois a remoção das partículas coloidais é o principal alvo do processo de coagulação. São conceituadas as propriedades físicas da água, consideradas como mais relevantes para o processo de coagulação e é descrito o processo de coagulação e os mecanismos que promovem a coagulação.

O capítulo 3 discorre sobre a instrumentação analítica utilizada para medição das características da água, sendo também feita uma avaliação da resposta de instrumentos de diferentes fabricantes. É feita também uma breve descrição do sistema de aquisição de dados utilizado para construção da base de dados que originou os modelos.

O capítulo 4 descreve a metodologia utilizada para se fazer a identificação do comportamento do operador e a predição da turbidez da água decantada. São apresentados também os critérios utilizados para validação dos dados, objetivando a eliminação de erros de medição.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos em campo. O capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho, além de apresentar proposta para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Características das Águas Naturais e dos Sistemas de Inferência Nebulosos Neuroadaptativos

2.1 Introdução

A água pura não existe na natureza, pois, sendo a água um ótimo solvente natural, nunca é encontrada em estado de absoluta pureza.

A água possui uma série de impurezas, que vão determinar suas características físicas, químicas e biológicas.

A água captada de diversas fontes, que em Estações de Tratamento de Água (ETAs) é denominada água bruta, contém substâncias dissolvidas e em suspensão de origem orgânica e mineral. Elas estão presentes na água devido a precipitações atmosféricas e cedidas pelos solos com os quais a água entra em contato em leitos subterrâneos e leitos superficiais. Além disso, a água é poluída com o metabolismo de plantas e animais aquáticos e os produtos de sua decomposição[48].

Águas subterrâneas contêm principalmente substâncias dissolvidas, enquanto águas superficiais, geralmente, são ricas em sólidos em suspensão.

Existem várias classificações das águas naturais, baseadas em diferentes abordagens. Tendo como parâmetro a origem, as águas são classificadas como pluviais (precipitações atmosféricas), subterrâneas (poços) e águas superficiais (rios, lagos). Pela quantidade e

características das impurezas as águas são divididas em doce, salgadas, duras, sem cor, turva, colorida, etc. Por seu uso as águas são classificadas como potáveis, domésticas, industrial, resfriamento, medicinal, etc.

A composição das águas naturais usualmente varia com o tempo. Matérias minerais e orgânicas, em suspensão, gradualmente decantam por gravidade. Parte das matérias orgânicas usualmente é consumida como alimento pelos organismos presentes na água. Os processos químicos e biológicos, que ocorrem nas águas naturais, destroem, facilmente, as substâncias orgânicas oxidáveis. A formação de hidróxidos de ferro, manganês e alumínio, e a agregação, por esses, de colóides presentes na água, também afetam a composição da água natural [48].

2.2 Poluentes da água

Na água são encontrados vários tipos de impurezas. Segundo N. F. Voznaya [48], essas impurezas podem ser classificadas em quatro grupos, de acordo com suas propriedades físico-químicas.

Primeiro grupo

São substâncias que estão completamente dissolvidas na água. Elas estão presentes como moléculas separadas ou íons.

As águas naturais podem conter:

- Soluções de vários gases como O_2 , N_2 , CO_2 , H_2S e outros;
- sais solúveis de sódio, potássio, cálcio, amônia, magnésio, alumínio, ferro, manganês, etc.

Essas substâncias dissolvidas não podem ser removidas da água pelos processos convencionais de filtração utilizados nas ETA's.

Segundo grupo

As substâncias presentes neste grupo formam sistemas coloidais com a água. Consistem em

partículas de moléculas agregadas. Os sistemas coloidais são formados de substâncias praticamente insolúveis em um dado líquido.

As partículas coloidais são pequenas e só podem ser vistas utilizando-se microscópios. São finamente divididas e também não podem ser removidas da água pelos processos convencionais de filtração utilizados nas ETA's.

Terceiro grupo

São sólidos em suspensão, presentes na água. Geralmente, partículas de areia, argila e matéria orgânica, que são removidas do solo pelo processo de erosão e outros. Sólidos deste tipo decantam. São retidos, apenas parcialmente, pelos processos convencionais de filtração utilizados nas ETA's.

Quarto grupo

As águas naturais são ricas em bactérias, algas, vírus, protozoários e outros organismos. Quanto maior a quantidade de nutrientes na água, mais rapidamente se desenvolve a proliferação biológica. Os microorganismos mais freqüentes são as bactérias, as quais tomam parte ativa na formação da população aquática. Cursos d'água poluídos com matéria orgânica de origem vegetal e animal são bons meios para o desenvolvimento de protozoários. Estes organismos se alimentam de bactérias e materiais em suspensão. Já os vermes, na sua maioria parasitas, vivem hospedados em animais e/ou nos seus órgãos internos. Os animais aquáticos e alguns grupos de plantas são infestados por vermes que neles parasitam. Mesmo protozoários e algas abrigam e nutrem os vermes. Parasitas não são prejudiciais somente aos peixes, mas, também ao homem, através deles. Juntamente com outros organismos, os vermes são bons indicadores da "saúde" dos cursos d'água. São utilizados na investigação das condições sanitárias das águas superficiais.

2.3 O estado coloidal

Segundo N. F. Voznaya [48] , o estado coloidal é um sistema disperso, com partículas com

tamanho variando de 1 a 100 milimicrons distribuídas em um meio líquido. É chamado de solução coloidal. O tamanho destas partículas excede aquele de uma molécula, e quando agregadas estas formam um setor separado do meio pela interface. Portanto, o sistema coloidal é heterogêneo, consistindo de duas (ou mais) fases, denominadas de setor disperso (um ou vários), que é a agregação de partículas, e o meio no qual o setor formado está disperso.

As propriedades principais do sistema coloidal estão associadas com a energia na interface livre. A quantidade de energia depende da superfície específica da partícula $s_0 = s/v$, onde s é a área total da superfície e v é o volume do setor disperso. A superfície específica aumenta somente até o limite do estado coloidal, porque acréscimos adicionais no tamanho da partícula, podem destruir a interface entre o setor disperso e o meio de dispersão, e a energia da interface livre desaparece. O sistema se torna homogêneo, isto é, uma solução verdadeira é formada.

Em síntese, a propriedade básica e mais importante do estado coloidal é aquela que uma proporção considerável da massa total e da energia livre do sistema está concentrada na interface.

2.3.1 Propriedades molecular e cinética de sistemas coloidais

Assim como as moléculas das soluções verdadeiras, as partículas coloidais estão em um estado de movimento caótico incessante. A intensidade deste movimento diminui rapidamente com o aumento das dimensões das partículas. O movimento contínuo impede a decantação das partículas e é uma das causas da estabilidade dos sistemas coloidais. O movimento randômico das partículas coloidais é chamado Movimento Browniano [20]. As partículas estão distribuídas em um sistema coloidal de uma maneira específica (figura 2.1).

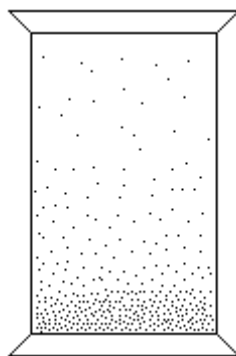


FIGURA 2.1: Equilíbrio da Sedimentação [48]

concentração do setor disperso nos níveis inferiores de uma solução é significativamente maior do que nos níveis superiores. A regularidade da distribuição das partículas coloidais no meio de dispersão foi formulada por Jean Baptiste Perrin (equilíbrio de sedimentação). A forma na qual as partículas coloidais são distribuídas no plano vertical da solução é muito semelhante à dos gases na atmosfera. Se o sistema coloidal, com tal distribuição de partículas em estado de equilíbrio, é sacudido ou misturado, ele retorna ao seu estado inicial, após um certo período de tempo. O tempo durante o qual o equilíbrio de sedimentação em um sistema coloidal é atingido, é pequeno, mas o equilíbrio persiste por um período indefinido.

2.3.2 Propriedades ópticas de sistemas coloidais

O sistema coloidal não apresenta a uniformidade ótica como característica. As partículas coloidais podem dispersar um feixe de luz em todas as direções. O caminho deste feixe que passa pela solução coloidal, quando visto lateralmente, aparece na forma de uma faixa de luz, assim como aquele que passa por um quarto escuro através de um buraco na persiana. Este efeito é conhecido como efeito Tyndall (figura 2.2). O efeito Tyndall é usado para distinguir soluções coloidais de soluções verdadeiras, tendo em vista que as soluções verdadeiras são "ópticamente limpas", porque suas minúsculas partículas não dispersam luz.

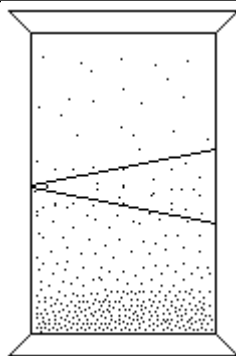


FIGURA 2.2: Efeito Tyndall [48]

As propriedades ópticas de sistemas dispersos são usadas para estudar sua estrutura, para determinar as dimensões e formas das partículas e sua concentração [40]. Todos estes dados são baseados na capacidade de medição de uma onda de luz eletromagnética e no tamanho das partículas coloidais. Desde que as partículas coloidais são consideravelmente menores do que o comprimento de onda, elas dispersam luz devido à difração (desvio de raios luminosos) em um sistema disperso micro heterogêneo.

2.3.3 Estrutura de uma partícula coloidal - A dupla camada elétrica

Segundo N. F. Voznaya [48], uma partícula coloidal tem estrutura complexa. O centro é o núcleo insolúvel em um dado meio. O núcleo é um micro cristal ou uma agregação de micro cristais. A superfície do núcleo adsorve íons (fixação das moléculas de uma substância, o adsorvato, na superfície de uma outra substância, o adsorvente) do meio circundante através da ação da energia na interface livre. Estes íons são íons que produzem potencial, tendo em vista que eles liberam carga elétrica para a partícula. À medida que os íons são adsorvidos, a energia na interface livre diminui e o sistema é estabilizado, não apresentando carga elétrica líquida.

Por exemplo, o íon que produz potencial para o sal de hidróxido férrico é o oxiclreto de ferro, o qual é formado de acordo com a equação (2.1):



O oxiclureto de ferro se dissocia de acordo com a equação (2.2):



O íon positivo FeO^+ é adsorvido seletivamente na superfície do núcleo do colóide e cede a ele uma carga positiva. Se um número n de íons FeO^+ são adsorvidos, a solução contém n íons de Cl^- . Os íons de Cl^- estão sujeitos a duas forças: a força eletrostática que os atrai para o núcleo da partícula coloidal, e a força de difusão a qual tende a dispersá-los na solução. Enquanto as duas exercem influência, os íons de cloreto se distribuem de forma diferente. Alguns deles ligam-se firmemente ao núcleo da partícula coloidal para formar uma camada fixa de adsorção ($n-x$), enquanto outros (x) formam a camada difusa (atmosfera iônica da partícula). A interface entre estas duas camadas é denominada superfície de cisalhamento. A combinação da camada difusa e da camada de adsorção forma a dupla camada elétrica.

O núcleo e a camada fixa formam o grânulo, enquanto o sistema, contendo o grânulo e a camada difusa, é chamado Micela.

Micela do hidróxido férrico

$\{m[Fe(OH)_3]$.	$nFeO^+ ; (n - x) Cl^-$	$x Cl^-$
Núcleo		Camada fixa	Camada difusa

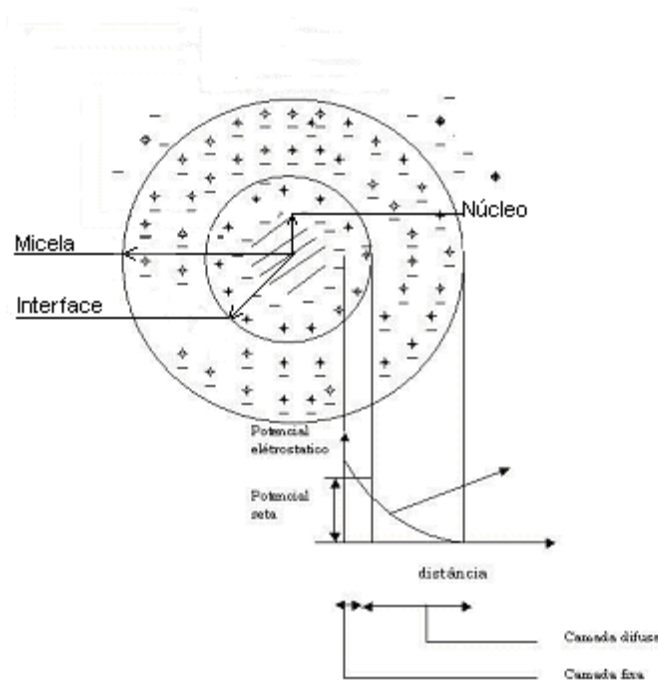


FIGURA 2.3: Representação do colóide [42]

A figura 2.3 mostrada esquematicamente, a estrutura da dupla camada elétrica. O potencial da fase sólida é compensado somente parcialmente, desde que, somente uma parte dos íons negativos, são mantidos próximos do núcleo na camada fixa (adsorção).

2.3.4 Estabilidade eletrostática

A partir do limite determinado pela camada difusa, a concentração de íons de cargas opostas se iguala, e por isso a partícula coloidal deixa de interferir no meio líquido.

Verifica-se que, quanto maior a concentração de íons na água (força iônica maior), menor será a distância a partir da superfície do colóide, em que serão iguais as concentrações de íons positivos e negativos.

Quando dois colóides semelhantes se aproximam um do outro, ocorre interação entre as camadas difusa fazendo com que haja repulsão devida a força eletrostática e atração devida às forças intermoleculares (conhecidas como forças de Van der Waals) [24]. O Movimento Browniano e a interação entre estas forças contribuem para a estabilidade do sistema. O trabalho para aproximação de duas partículas coloidais, semelhantes, é aquele necessário para vencer a energia de repulsão resultante da atuação das duas forças, quando a força iônica do meio é pequena. A força de repulsão atinge o valor máximo a partir da superfície da partícula coloidal próxima aquela em que se tem o plano de cisalhamento. Por isso o Potencial Zeta pode fornecer indicações do grau de estabilidade de um sistema coloidal, sendo esta uma informação importante no processo de coagulação, onde se deseja desestabilizar o sistema coloidal, promovendo a aglutinação das partículas.

A tabela 2.1 apresenta valores de Potencial Zeta obtidos a partir de experiências com vários tipos de colóides que resultaram nos padrões gerais apresentados [42].

TABELA 2.1: Correlação entre Potencial Zeta e estabilidade de colóides

Relação entre a estabilidade de colóides e potencial zeta	
Características de Estabilidade	Potencial zeta (milivolts)
Máxima aglomeração e precipitação	+ 3 a zero
Excelente aglomeração e precipitação	-1 a -4
Fraca aglomeração e precipitação	-5 a -10
Fronteira de aglomeração (Aglomeração de 2 a 10 colóides)	-11 a -20
Patamar de pequena estabilidade (Poucos aglomerados)	-21 a -30
Estabilidade moderada (Sem aglomerados)	-31 a -40
Boa estabilidade	-41 a -50
Estabilidade muito boa	-51 a -60
Estabilidade excelente	-61 a -80
Máxima estabilidade	-81 a -100

2.4 Principais propriedades físicas da água

2.4.1 Cor

Cor na água pode ser resultado da presença de íons metálicos naturais como ferro ou manganês, de restos de vegetais ou de resíduos industriais, entre outros. A cor deve ser removida para tornar a água adequada para aplicações gerais e industriais.

Definição

O termo cor é aqui usado com o significado de cor verdadeira, isto é, aquela devido a íons dissolvidos, onde a turbidez foi removida. O termo cor aparente inclui não somente a cor devido a substâncias em solução, mas também devido a materiais em suspensão (turbidez). A cor aparente é determinada na amostra original sem filtração ou centrifugação.

Na determinação da cor são utilizados padrões em escala platina cobalto (PtCo), comparando-os à amostra de água. Uma unidade de cor nesta escala refere-se a cor apresentada por uma solução aquosa que contenha 1 mg de platina, do cloroplatinato de potássio e cerca de 0,5 mg de cobalto, do cloreto cobaltoso hexaidratado por litro [10].

Determinação da Cor

- Pré-tratamento da amostra de água para remoção de turbidez

Para determinar a cor por métodos aceitos atualmente, a turbidez deve ser removida antes da análise. O método ótimo para remoção de turbidez sem remoção de cor não foi encontrado ainda. A filtração produz resultados que são reproduzíveis, entretanto, alguns procedimentos de filtração podem remover alguma cor verdadeira. A centrifugação evita interação da cor com o material filtrante, mas os resultados variam com a natureza da amostra e a velocidade da centrífuga. Quando é necessária a diluição da amostra, dependendo se ela precede ou segue a remoção de turbidez, esta pode alterar a cor medida se corpos coloridos maiores estão presentes.

- Método de Medição

Os dois métodos utilizados são de comparação visual e o espectrofotométrico. No primeiro a cor é determinada por comparação visual da amostra com uma solução colorida de concentração conhecida. A comparação também pode ser feita com discos de vidros coloridos calibrados adequadamente. O segundo possui sensibilidade muito baixa para valores abaixo de 5mg/l (PtCo) e a escala é limitada a 500 mg/l (PtCo).

Para medição de cor aparente e cor verdadeira existem analisadores em linha que utilizam o método espectrofotométrico.

- Interferências

A turbidez presente na amostra interfere na medição de cor e deve ser eliminada. Para isto recomenda-se a centrifugação. Se para a remoção de turbidez for utilizada a filtração, é necessário cautela com relação ao filtro utilizado, pois parte da cor pode ser removida por este. O pH da amostra também interfere nos resultados das medidas e deve ser mantido em torno de 7,6.

2.4.2 Turbidez

Pureza (clareza) da água é importante quando seu uso é destinado ao consumo humano e em várias aplicações industriais. Produção de bebidas, processamento de alimentos e estações de tratamento de águas superficiais usualmente contam com a coagulação, decantação e filtração para assegurar que a água tratada tenha características satisfatórias.

A turbidez na água é causada por partículas em suspensão, tais como argila, detritos sílicos-argilosos, partículas orgânicas e inorgânicas finamente divididas, compostos orgânicos solúveis (dissolvidos) coloridos e outros microorganismos.

Definição

Turbidez é uma expressão da propriedade óptica que provoca a dispersão e absorção de luz ao invés de sua propagação em linha reta através de uma amostra. É expressa em UT (unidade de turbidez).

Uma amostra de água colorida por substâncias dissolvidas é um sistema homogêneo que somente atenua a radiação que passa através da amostra. Uma amostra de água contendo substâncias não dissolvidas atenua a radiação incidente, e em adição, as partículas não dissolvidas, as quais estão presentes, dispersam a radiação desigualmente em todas as direções. A dispersão da radiação promovida pelas partículas afeta a atenuação tal que o coeficiente de atenuação espectral $\mu(\lambda)$ é a soma do coeficiente de dispersão espectral $s(\lambda)$ e o coeficiente de absorção espectral $\alpha(\lambda)$ [30]:

$$\mu(\lambda) = s(\lambda) + \alpha(\lambda) \quad (2.3)$$

Para obter o coeficiente de dispersão espectral $s(\lambda)$, o coeficiente de absorção espectral $\alpha(\lambda)$ precisa ser conhecido. Com o objetivo de determinar o coeficiente de absorção espectral de substâncias dissolvidas, as substâncias não dissolvidas podem, em alguns casos, serem removidas por filtração, mas isto pode causar interferências. Portanto, é necessário registrar os resultados da determinação da turbidez em comparação com um padrão de calibração.

A intensidade da radiação dispersa depende do comprimento de onda da radiação incidente, do ângulo de medição, e da forma, características ópticas e distribuição por tamanho das partículas suspensas na água.

Em medições da atenuação da radiação incidente, o valor medido depende do ângulo de abertura Ω_0 da radiação efetiva que chega ao receptor.

Quando medindo a radiação dispersa, o valor medido depende do ângulo θ e do ângulo de abertura Ω_θ . O ângulo θ é aquele formado pela direção da radiação incidente e pela direção da radiação dispersa medida (veja figura 2.4).

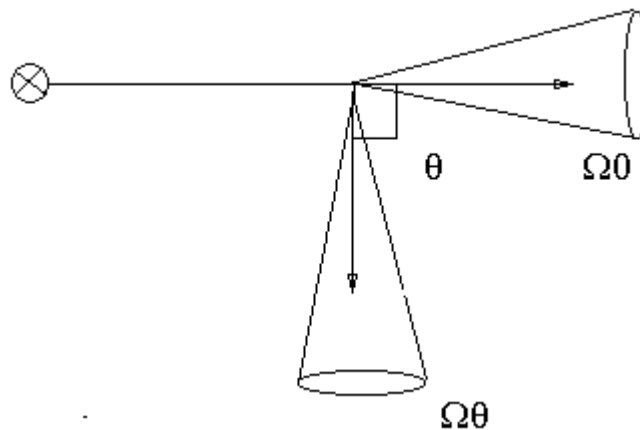


FIGURA 2.4: Medição da atenuação e dispersão da radiação transmitida [30]

- Método de Medição

O método atualmente utilizado para medição de turbidez é o método nefelométrico. Este método é baseado na comparação da intensidade de luz dispersa pela amostra sob condições definidas com a intensidade de luz dispersa por uma suspensão de referência padrão sob as mesmas condições. Quanto maior a intensidade de luz dispersa, maior a turbidez. O polímero formazina é usado como a suspensão padrão para turbidez de referência.

A maioria dos turbidímetros comerciais disponíveis para medir baixos valores de turbidez (em faixas tipicamente entre 0 e 40 UT) dá comparativamente boas indicações da intensidade de luz dispersa em uma direção particular, predominantemente em ângulo reto com a luz incidente. Estes nefelômetros apesar de serem influenciados por pequenas mudanças nos parâmetros de projeto são especificados como o instrumento padrão para medição de baixos valores de turbidez. O Standard Methods [10] estabelece os critérios de projeto a serem utilizados pelos fabricantes destes instrumentos.

Para águas com altos valores de turbidez (em faixas tipicamente entre 40 e 4000 UT) é feita a medição da atenuação da luz incidente [30].

- Interferências

A turbidez pode ser determinada para qualquer amostra de água que esteja livre de decantação e partículas pesadas de rápida sedimentação. Cubetas (para análises feitas em laboratório) ou lentes (para analisadores de linha) sujas, a presença de bolhas de ar, e os efeitos de vibrações que prejudicam a visibilidade da superfície da amostra darão resultados falsos. A Cor verdadeira, isto é, a cor da água devido a substâncias dissolvidas que absorvem luz provoca redução nas medidas de turbidez. O efeito geralmente não é significativo no caso de água tratada, mas no caso da água bruta, dependendo das características da água, ele é bastante significativo e deve ser considerado.

2.4.3 pH

Definição

O "pH" ou potencial hidrogeniônico é um termo que expressa a intensidade da condição ácida ou básica de um determinado meio. É uma medida da concentração de íons de hidrogênio (H^+) e definido como sendo o cologarítmo decimal da concentração efetiva ou atividade dos íons hidrogênio.

$$pH = - \log a_{H^+} \quad (2.4)$$

A determinação do pH é uma das mais comuns e importantes tarefas no contexto da química da água. Nas ETAs, o pH intervém na coagulação química, controle da corrosão e desinfecção.

- Método de Medição

Os analisadores de pH usam métodos eletroquímicos para a determinação da atividade de íons de hidrogênio, pela medição do potencial gerado quando se utiliza um eletrodo com membrana de vidro mergulhado na amostra e um eletrodo de referência.

O eletrodo de vidro é um bulbo construído em vidro especial contendo uma solução de

concentração fixa de ácido clorídrico (HCl) ou uma solução tamponada de cloreto em contato com o eletrodo de referência interno, normalmente constituído de prata revestida de cloreto de prata, que assegura um potencial constante na interface da superfície interna do sensor com o eletrólito. O elemento sensor do eletrodo, situado na extremidade do bulbo, é constituído por uma membrana de vidro que, hidratada, forma uma camada de gel, externa, seletiva de íon hidrogênio. Ocorre, na camada externa do sensor, a geração de um potencial que é função da atividade do íon hidrogênio na solução. A variação do potencial do eletrodo como resposta à variação do pH do meio de medição é linear. O eletrodo de vidro gera uma tensão de aproximadamente 58mV / pH. O ponto zero elétrico é o valor do pH da solução tamponada interna ao eletrodo, que usualmente tem pH igual a 7.

O eletrodo de referência é caracterizado pelo fato de ser independente do valor do pH do meio de medição. Os eletrodos de referência mais conhecidos são o calomelano e o prata/cloreto de prata (Ag/AgCl). O eletrodo calomelano, por ser um sistema baseado em mercúrio, não é mais utilizado devido aos riscos que impõe ao ambiente. O eletrodo Ag/AgCl é o mais utilizado atualmente e consiste de um fio de prata revestido com cloreto de prata imerso diretamente (Ag/AgCl junção única) ou em contato através de junção (Ag/AgCl junção dupla) no/com eletrólito cloreto de potássio 3M saturado com cloreto de prata contido por um bulbo provido de junção. O eletrodo Ag/AgCl junção única tem sido utilizado na maioria das aplicações de laboratório e de campo.

Na prática, os eletrodos de vidro e de referência são integrados em um eletrodo combinado. A adequação do eletrodo à aplicação é fundamental para o bom desempenho do sistema de medição.

Para medir a diferença de potencial gerada pelo eletrodo é utilizada uma unidade eletrônica que amplifica o sinal gerado no eletrodo, disponibiliza uma saída elétrica analógica ou digital e possibilita a calibração do sistema de medição.

O procedimento básico de calibração inclui os ajustes de desvio lateral (intercept) e inclinação (slope), conforme figura abaixo, utilizando soluções tampões padrões. O ajuste de desvio lateral é usado para corrigir desvios laterais da curva “potencial X pH”, com relação ao ponto isopotencial (pH = 7 e E = 0). A calibração do instrumento com uma solução tampão de pH 7

é uma aplicação prática de correção de desvio lateral. O ajuste de inclinação é usado para corrigir desvios de inclinação, decorrentes por exemplo, da influência da temperatura e seu efeito é de promover uma rotação da curva “potencial X pH” em torno do ponto isotencial. Na prática, para evitar desvios de inclinação, para uma dada temperatura, após calibrar o eletrodo com solução tampão de pH 7, deve-se calibrá-lo, com o auxílio de um outro tampão, normalmente de pH 4. O uso de tampões alcalinos, isto é, pH 9,2 ou pH 10, não é recomendável, pois o valor do pH de tais soluções diminui gradativamente devido à absorção de dióxido de carbono do ambiente, tornando a solução imprópria para calibração.

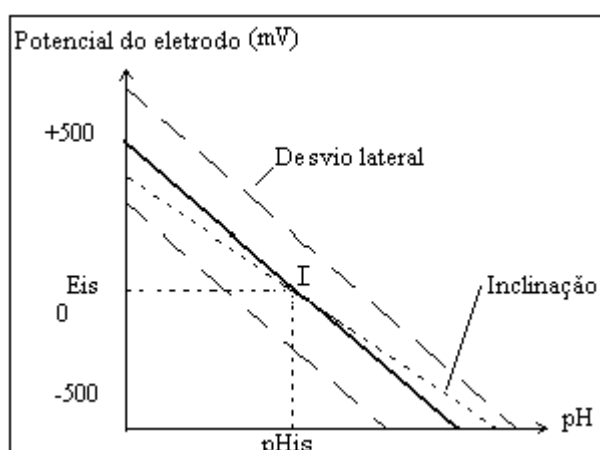


FIGURA 2.5: E_{is} = potencial no ponto isotencial
 pH_{is} = pH no ponto isotencial
I = ponto isotencial

- Interferências

A temperatura influencia as medidas de pH sendo que, o aumento da temperatura causa um aumento na inclinação da curva “potencial X pH”. Pode-se considerar um aumento de 5mV/unidade de pH a cada 25°C. Em torno do ponto isotencial o valor do pH é independente da temperatura. Se as medições a serem feitas se localizam nesta faixa a compensação de temperatura não é necessária. A compensação de temperatura também é desnecessária em aplicações onde não existe variação de temperatura.. Em quaisquer outras condições, a compensação de temperatura é requerida para se obter medidas precisas.

Normalmente são empregados sensores de temperatura do tipo Pt 100, incorporados aos eletrodos.

Para medições de pH maior que 10 e menor que 1 há a necessidade de se utilizar eletrodos próprios preparados para minimizar interferências que ocorrem nestas faixas de medição.

A conexão entre o eletrodo de referência e o meio é estabelecida por íons. A interrupção ou obstrução desta conexão iônica afeta o valor medido. Incrustações no eletrodo de vidro e no diafragma do eletrodo de referência influenciam as medidas e podem ser minimizados, reduzindo-se a necessidade de intervenções freqüentes no instrumento, através do uso de eletrodos apropriados.

Um aspecto importante a ser observado é relativo às características da unidade eletrônica que deve garantir alta resistência a interferências eletromagnéticas e alto grau de proteção a interferência de tensões provenientes do meio onde se faz a medição, devido a cargas eletrostáticas e aterramento inadequado de dispositivos tais como bombas, agitadores, etc. É fundamental que a unidade eletrônica tenha alta impedância de entrada.

2.4.4 Condutividade

Definição

Condutividade é uma medida da capacidade de uma solução conduzir a corrente elétrica. Materiais nos quais a corrente é conduzida por íons ao invés de elétrons (como em condutores metálicos) são chamados eletrólitos. Eles são divididos em dois grupos, eletrólitos fortes e fracos, de acordo com seu comportamento de dissociação, isto é a propriedade de compostos químicos dissolvidos em um líquido separarem totalmente ou parcialmente em grupos separados de íons. Eletrólitos fortes são totalmente dissociados na solução, isto é, eles são quebrados em íons. O grupo de eletrólitos fortes inclui todos os ácidos e bases fortes (HCl, NaOH). A água é um exemplo de eletrólito fraco, pois a dissociação em íons ocorre parcialmente [10]. A condutividade é usualmente expressa em microsiemens por centímetro ($\mu\text{s/cm}$).

- Método de Medição

Seja um cilindro líquido de comprimento L e seção transversal A que tem uma resistência R , sua resistência específica é:

$$\rho = R \cdot L/A \quad (2.5)$$

A condutividade χ é o inverso da resistência específica, portanto é dada pela equação (2.6):

$$\chi = (1/R) \cdot (L/A) \quad (2.6)$$

Sendo $G = 1/R$, a condutância, a condutividade é expressa por:

$$\chi = G \cdot (L/A) \quad (2.7)$$

Na prática a condutividade é medida usando-se célula de medição de condutividade e a relação L/A é definida como a constante da célula (k). Logo:

$$\chi = k \cdot G \quad (2.8)$$

A condutividade é medida usando-se corrente alternada. As frequências mais utilizadas estão na faixa de 50 Hz a 5 KHz. Baixas frequências são preferencialmente utilizadas na medição de baixos valores de condutividade tendo em vista que os efeitos devido a polarização nos eletrodos são desprezíveis considerando a alta resistência do eletrólito. Inversamente, frequências maiores reduzem a influência da polarização nas superfícies dos eletrodos no caso de altas condutividades [16].

- Interferências

A condutividade depende do tipo de eletrólito, da concentração total de íons e da temperatura da solução. Dependendo do tipo de substância dissolvida (ácido fraco, ácido forte) e das propriedades eletroquímicas da substância específica associada (valência, eletronegatividade, tamanho do íon, mobilidade do íon, grau de dissociação), o aumento da condutividade elétrica mantém uma relação linear com o aumento na concentração de sólidos totais [16].

2.5 O Processo de Coagulação

A coagulação em uma ETA é realizada através da adição de sais de alumínio ou ferro, ou polímeros sintéticos na água. Ela é o resultado de dois fenômenos:

O primeiro, essencialmente químico, consiste na reação química onde os reagentes (água e sal) reagem, com a produção de espécies hidrolisadas [15]. A reação de hidrólise de um sal é a reação entre o sal e a água, com a produção do ácido e da base correspondente. Quem sofre a hidrólise não é o sal, mas o íon correspondente ao ácido ou base fracos. Os sais utilizados em tratamento de água são sais de base fraca e ácido forte. O íon que hidrolisa libera, na água, o íon de carga elétrica de mesmo sinal. No caso dos sais de alumínio e ferro são liberados íons de carga elétrica positiva. A quantidade de íons de carga positiva liberados depende da concentração do sal e provocará alteração no pH da solução que se tornará tanto mais ácida quanto maior esta quantidade.

O segundo fenômeno, essencialmente físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato com as impurezas presentes na água, promovendo a desestabilização do sistema coloidal. O processo é muito rápido, variando desde décimos de segundo a cerca de 100 segundos, dependendo das demais características (pH, temperatura, quantidade de impurezas, etc.). Ele é realizado em uma ETA, na unidade de mistura rápida [15].

A coagulação depende fundamentalmente das características da água e das impurezas presentes conhecidas através de parâmetros como pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez, temperatura, mobilidade eletroforética, força iônica, sólidos totais dissolvidos, tamanho e distribuição de tamanho das partículas em estado coloidal e em suspensão, etc., fazendo com que seja necessário o conhecimento da água que será tratada ao longo dos vários períodos do ano [15].

2.6 Mecanismos de coagulação

Segundo Di Bernardo [15], a coagulação é considerada como sendo o resultado de quatro mecanismos distintos:

2.6.1 Compressão da camada difusa

Neste caso o sistema coloidal é desestabilizado pela introdução de um eletrólito indiferente. Eletrólitos indiferentes são sais simples, como o cloreto de sódio, que não têm característica de hidrólise ou adsorção. Neste caso a desestabilização ocorre devido a interações eletrostáticas, pois o aumento na concentração de íons positivos e negativos, na água acarreta um acréscimo no número de íons na camada difusa, que para manter-se eletricamente neutra, tem seu volume necessariamente reduzido, o que faz com que as forças de Van der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilidade eletrostática. Entretanto, os coagulantes usados em tratamento de água não são eletrólitos indiferentes, indicando que além da compressão da camada difusa poderão ocorrer outros fenômenos.

2.6.2 Adsorção e neutralização de cargas

Neste caso a desestabilização do sistema coloidal ocorre devido a interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente. Segundo Di Bernardo [15], é provável que as interações coagulante-solvente sejam responsáveis pela adsorção do coagulante na interface colóide-água. No caso de espécies hidrolisadas de alumínio e de ferro ou de polímeros sintéticos catiônicos, é comum ocorrer a adsorção específica, causada pela interação entre coagulante e colóide.

O mecanismo de adsorção e neutralização de cargas é utilizado em estações de tratamento de água com filtração direta, onde há a necessidade de desestabilização das partículas para posterior retenção no leito filtrante e não a produção de flocos para posterior sedimentação.

2.6.3 Varredura

Neste caso não há a preocupação de se eliminar a estabilidade eletrostática do sistema coloidal. Promove-se a saturação da água com o sal (coagulante), controlando-se o pH da mistura, o que poderá provocar a formação de precipitados do tipo $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$, que envolvem as partículas coloidais, que adquirem maior volume, facilitando sua sedimentação. A condição ótima de coagulação pode não corresponder àquela em que é mínimo o potencial zeta.

O mecanismo de varredura é muito utilizado em ETAs convencionais, onde se tem a floculação e decantação antecedendo a filtração.

2.6.4 Adsorção e formação de pontes

Existe uma variedade significativa de compostos orgânicos sintéticos e naturais caracterizados por grandes cadeias moleculares que gozam da propriedade de apresentar sítios ionizáveis ao longo da cadeia e atuar como coagulantes. Estes polímeros, quando utilizados como coagulantes ou auxiliares de coagulação, possuem características de adsorção e formação de pontes entre si e os colóides [15].

Capítulo 3

Instrumentação Analítica para Medição das Características da Água e Sistema para Aquisição de Dados

3.1 Introdução

Na ETA / SRV, as análises nos vários sub processos são feitas, periodicamente, por um operador, utilizando-se analisadores de bancada existentes no laboratório. Existe um critério operacional que define que a análise na água tratada seja feita em intervalos máximos de 2 horas. As análises feitas ao longo do processo de tratamento e necessárias para nortear as ações do operador são realizadas a cada troca de turno de operação, no mínimo, ou quando houver necessidade evidenciada pelo operador, que percebe alguma perturbação no processo. Os resultados obtidos são registrados e utilizados para efetuar ajustes no processo de tratamento. Intervenções no processo baseadas nos resultados das análises são efetuadas manualmente, pelo operador, considerando-se alguns procedimentos pré estabelecidos para condições operacionais típicas e a sua própria experiência para as condições atípicas. Como é grande a quantidade de parâmetros de qualidade de água e de pontos de ajuste nos diversos sub processos é freqüentemente necessário que o operador efetue reajustes, baseado em sua experiência, mesmo nas condições operacionais típicas.

Neste cenário, verificou-se ser extremamente difícil, a obtenção de modelos que pudessem ser utilizados no projeto de sistemas de controle automático. Foi necessário portanto, para desenvolvimento deste trabalho, a instalação de instrumentos “on line”. Tal fato aliado à inexperiência na utilização de instrumentação analítica “on line”, gerou a necessidade de se

desenvolver uma pesquisa, essencialmente dedicada a avaliar as técnicas de medição dos diversos parâmetros que caracterizam a água e são utilizadas na implementação dos instrumentos “on line”.

Os instrumentos analíticos “on line” representam uma geração de equipamentos, capazes de fornecer dados em tempo real para as mais diversas necessidades, tais como controle automático de dosagem de produtos químicos, monitoramento em redes de distribuição de água, identificação de anomalias e falhas operacionais, etc.. Entretanto, como ficou demonstrado durante o período de colocação de tais instrumentos em operação, é necessário avaliar a resposta de cada instrumento, identificar a técnica de medição mais adequada, estabelecer as necessidades de processamento do sinal de saída e critérios de validação dos dados, antes que qualquer técnica de modelagem ou sistema de controle de processo, possa fazer uso dos dados fornecidos por eles. A utilização dos dados sem nenhum tipo de pré-tratamento pode comprometer a eficiência e/ou a confiabilidade do modelo ou do sistema de controle, tendo em vista a existência de erros provenientes de mal funcionamento ou descalibração de instrumentos e sistemas de amostragem.

A seguir é feito um breve histórico sobre a implantação dos instrumentos analíticos “on line”, utilizados na elaboração deste trabalho.

3.2 Análise de turbidez

Para efetuar as análises de turbidez na água bruta, na água decantada e na água tratada foram instalados três turbidímetros na água bruta e dois turbidímetros na água decantada e tratada de fabricantes diferentes. O objetivo foi avaliar as características funcionais, de desempenho e físicas dos instrumentos. Também foram avaliadas as necessidades de manutenção impostas por eles para garantir a continuidade da operação.

3.2.1 Análise de altos valores de turbidez

Para análise da turbidez da água bruta, os instrumentos foram instalados próximos ao canal de chegada de água bruta sendo a amostragem feita por um sifão. Os resultados apresentados

pelos instrumentos foram comparados com os resultados das análises realizadas nos instrumentos de laboratório, periodicamente, sendo que nesta fase foi observado que variações na vazão da amostra, decorrentes de flutuações no nível do canal, devido à variação de vazão aduzida à ETA, implicavam em erro na medição, sempre que a vazão da amostra ficava fora da faixa de vazão estabelecida para o instrumento. Para solucionar este problema, foi colocado entre o ponto de amostragem e a entrada dos instrumentos uma caixa de nível constante.

A instalação adequada é fator determinante para a correta operação do instrumento. As variáveis que interferem na medição, tais como:

- presença de bolhas de ar;
- variações na vazão da amostra;
- presença de luz no elemento de medição;
- vibração.

devem ser considerados no projeto de instalação.

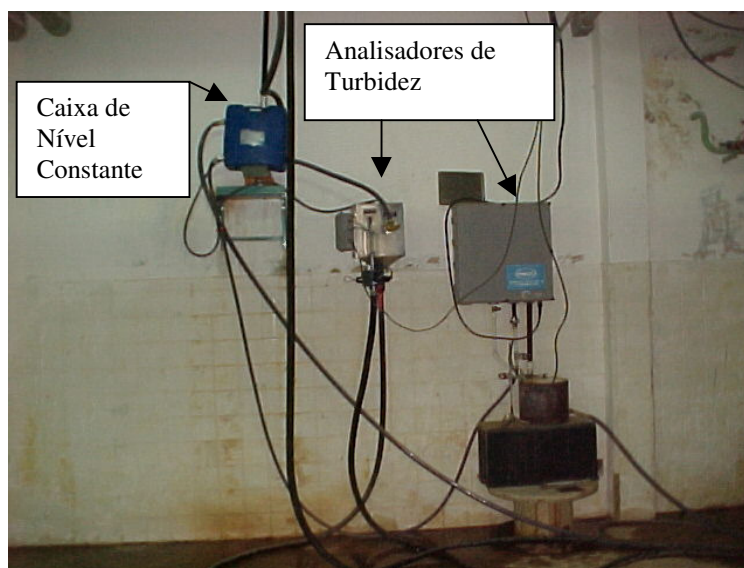


FIGURA 3.1: Analisadores de turbidez - Água Bruta

Os resultados das análises são apresentados nas figuras 3.2 e 3.3, graficamente, através de séries históricas temporais, referentes ao período em que estes instrumentos foram avaliados.

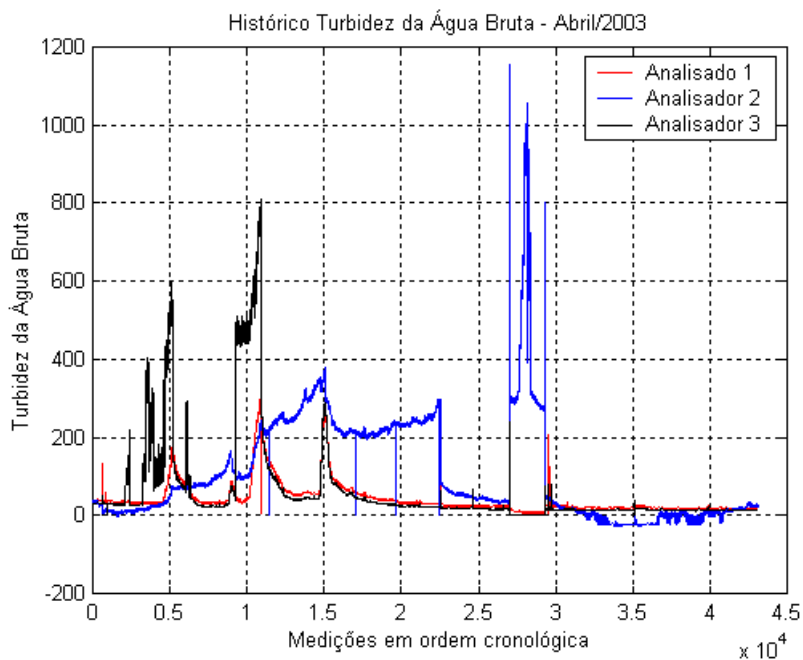


FIGURA 3.2: Série histórica temporal - Analisadores de turbidez - Água Bruta

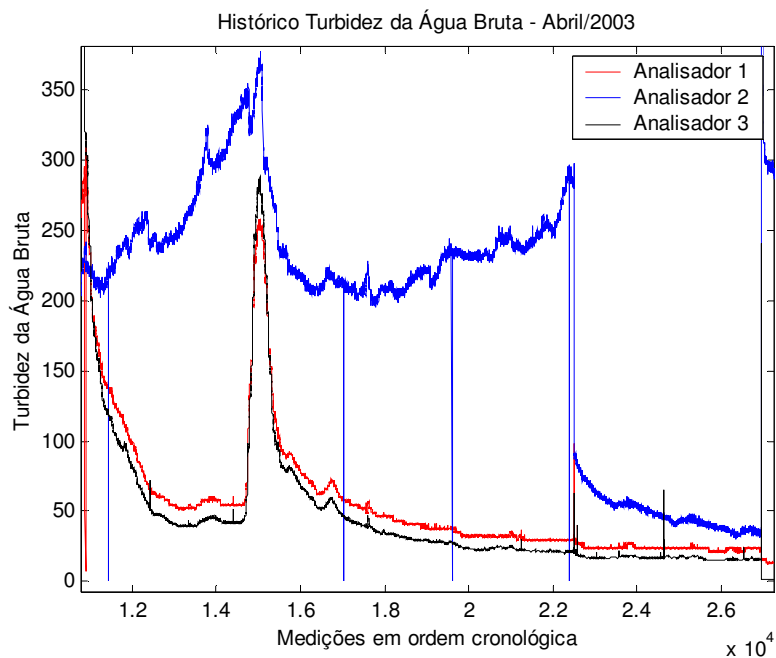


FIGURA 3.3: Série histórica temporal - Analisadores de turbidez - Água Bruta - Zoom

Os turbidímetros foram calibrados com formazina, de acordo com as instruções do fabricante, e apresentaram essencialmente os mesmos resultados para uma suspensão de teste de formazina. Quando analisando água, apresentaram resultados que foram significativamente diferentes em valores absolutos, e no caso do analisador 2 diferiu em tendência, quando comparado com os analisadores 1 e 3.

O fato dos resultados apresentados pelos instrumentos serem os mesmos para suspensão de formazina e diferentes para a água pode ser explicado considerando que na água as partículas variam muito em tamanho e forma, o que não ocorre na formazina, onde a forma das partículas é mais homogênea e o tamanho aproxima-se muito de um valor médio.

O “Standard Methods” define os critérios para projeto destes instrumentos, mas estes ajudam a limitar e não eliminar inconsistências associadas com medidas de turbidez em instrumentos diferentes, apesar de se utilizar a mesma suspensão para calibração.

Observou-se que algumas soluções de projeto do instrumento podem inviabilizar a sua utilização, em determinadas aplicações, apesar dos critérios de projeto atenderem àqueles estabelecidos pelo “Standard Methods”, ou seja:

- Fonte de luz - Lâmpada com filamento em tungstênio funcionando na cor de temperatura entre 2200 e 3000 °K.
- Distância percorrida pela luz incidente e luz dispersa dentro do tubo da amostra - Total não exceder 10 cm.
- Ângulo da luz recebida pelo detector - Centrada a 90° do caminho da luz incidente e não exceder $\pm 30^\circ$ a partir dos 90° [10].

O analisador 3 possui um tubo que faz o condicionamento da amostra, antes que a mesma alcance a parte ótica do instrumento. Para a água bruta do Rio das Velhas, que apresenta na estação chuvosa, turbidez elevada e grande quantidade de sólidos em suspensão, este sistema de condicionamento propiciou o aparecimento de incrustações, provocando turbulência no fluxo da amostra, que deve ser laminar ao passar pela fonte de luz e detectores e requerendo manutenção freqüente para se efetuar limpeza. Com isto, a resposta deste analisador sofreu

interferência, e o sinal de saída apresentou características que exigem algoritmos complexos para se fazer a validação de dados.

O analisador 2 constitui-se de uma sonda de medição que deve ser submersa ou instalada em tubulação e a unidade eletrônica. Também apresentou o inconveniente de exigir limpeza freqüente e os resultados das análises divergirem muito em valor absoluto com relação aos outros dois analisadores e ao turbidímetro de bancada.

Não foi observada nenhuma evidência que indique que um instrumento é mais exato que o outro. Os resultados apenas mostram que o projeto do instrumento é um fator significativo nas medidas de turbidez.

Após a avaliação dos turbidímetros na água bruta, para montagem da base de dados, optou-se pela utilização do analisador 1, por ter sido considerado aquele que possui características de projeto mais adequadas às características da água bruta do Rio das Velhas, por necessitar de menos intervenções para continuidade da operação e por ser mais robusto, minimizando interferências devido à bolhas de ar e variação na vazão da amostra.

3.2.2 Análise de baixos valores de turbidez

Para medição de baixos valores de turbidez, ou seja, turbidez da água decantada e tratada, utilizou-se dois instrumentos, tendo sido garantido que a mesma amostra foi fornecida a ambos, quando analisando água decantada ou tratada. Um dos instrumentos faz compensação de cor (analisador 2) e outro não faz compensação de cor (analisador 1).

Da mesma forma que os instrumentos para análise de altos valores de turbidez, existem diferenças de implementação nos dois instrumentos decorrentes de soluções de projetos diferentes.

No caso do analisador 2 são utilizadas duas fontes de luz para iluminar a amostra e dois detectores. A medição é feita em duas fases a cada 0,5 segundos. Na primeira fase, a fonte de luz 1 pulsa um feixe de luz diretamente no fotodetector 1, diametralmente oposto.

Simultaneamente, o fotodetector 2 mede a luz dispersa num ângulo de 90°. Na Segunda fase, a fonte de luz 2 pulsa um feixe de luz diretamente no fotodetector 2, diametralmente oposto. Simultaneamente, o fotodetector 1, mede a luz dispersa num ângulo de 90°. São geradas portanto 4 medições independentes a partir das duas fontes de luz. Na unidade eletrônica é implementado um algoritmo que calcula o valor da turbidez a partir das 4 leituras.

O analisador 1 não faz compensação de cor, portanto a medição considera apenas luz dispersa a 90°.

Conforme já dito no capítulo 2, as medidas de turbidez podem ser afetadas pela presença de substâncias dissolvidas que absorvem luz (substâncias que aplicam cor). Neste caso, trata-se de cor verdadeira ou seja, a cor da água cuja turbidez tenha sido removida. A presença de cor verdadeira faz com que a turbidez medida, em um instrumento que não tenha compensação de cor, seja baixa. Este fato explica os resultados obtidos onde, os instrumentos sem compensação de cor apresentaram resultados sistematicamente menores que aqueles que fazem compensação de cor.

Devido às características construtivas, o analisador 2 não foi adequado para aplicação na água decantada, requerendo constantes intervenções para limpeza, apresentando desvios de medição quando comparado com o analisador 1 e o analisador de bancada. Portanto, para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados os dados referentes à turbidez da água decantada provenientes do analisador 1.

Os resultados das análises de turbidez da água decantada e tratada são apresentados nas figuras 3.4, 3.5 e 3.6 através de séries históricas temporais.

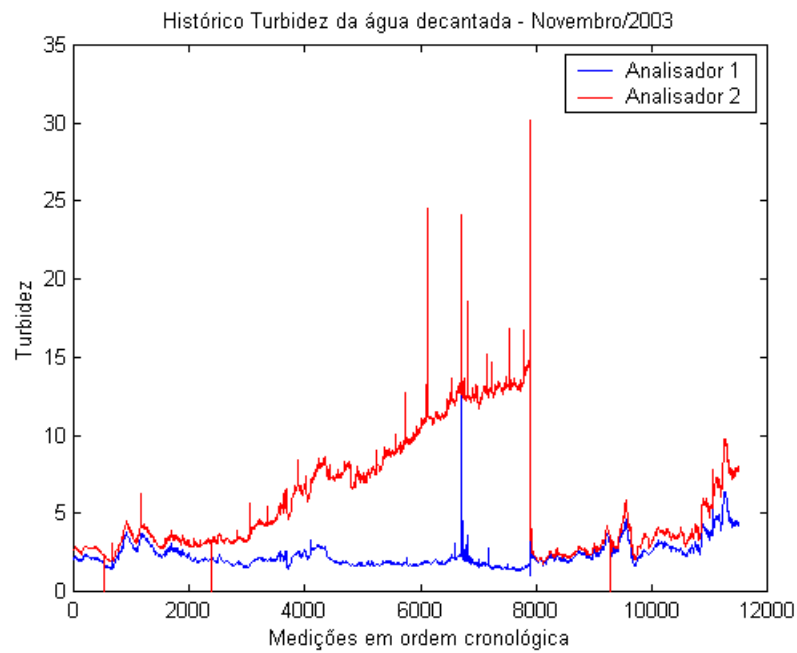


FIGURA 3.4: Série histórica temporal - Analisadores de turbidez - Água Decantada

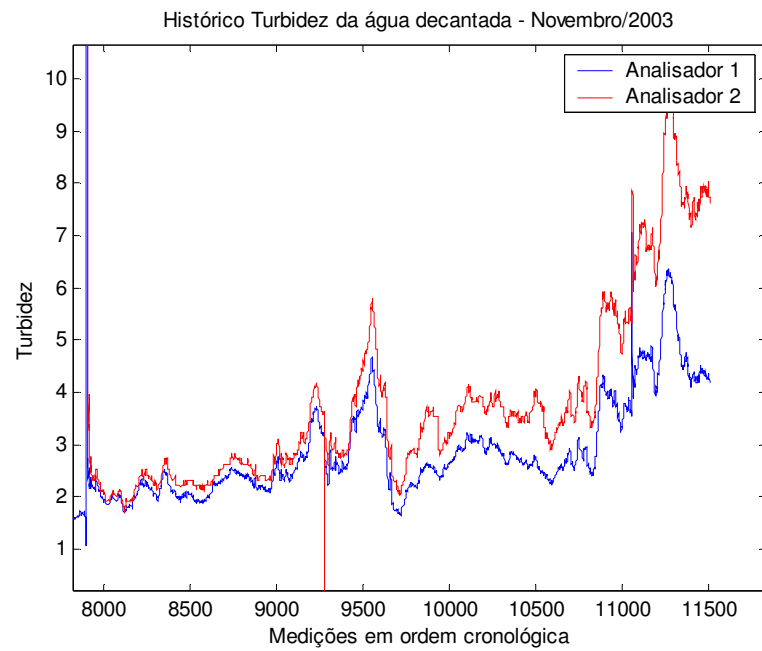


FIGURA 3.5: Série histórica temporal - Analisadores de turbidez - Água Decantada - Zoom

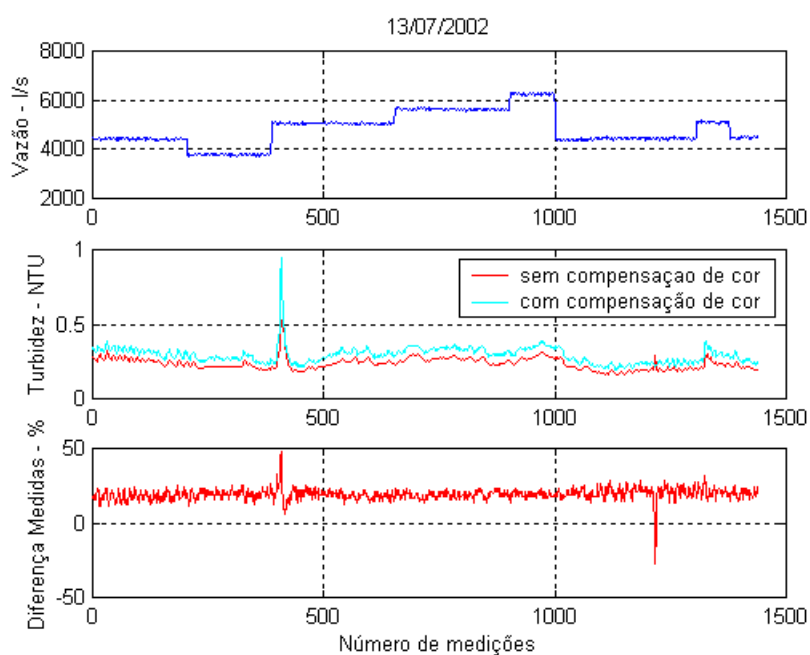


FIGURA 3.6: Série histórica temporal - Analisadores de turbidez - Água Tratada / Vazão Água Bruta

3.3 Análise de pH

O elo mais frágil de um analisador de pH são os eletrodos. Estes eletrodos são constituídos de uma membrana de vidro que fornece um potencial elétrico, através de um eletrólito e eletrodos de medição e referência. Existem diversos eletrodos disponíveis no mercado, podendo ser encontrados separados, combinados, integrados ou não a sensores de temperatura. Utilizam materiais diferentes nos eletrodos de medição e referência, qualidades e formatos de membranas de vidro diferentes, existem variações nos eletrólitos e nos invólucros de proteção para instalação em linha, etc.. Para aplicação na água coagulada, um fator crítico é a deposição de resíduos no eletrodo.

Os analisadores de pH foram instalados próximos ao canal de água coagulada, conforme mostrado na figura 3.7.



FIGURA 3.7: Analisadores de pH - Água Coagulada

Foram avaliados dois analisadores de pH. Os resultados das análises são apresentados graficamente através de séries históricas temporais:

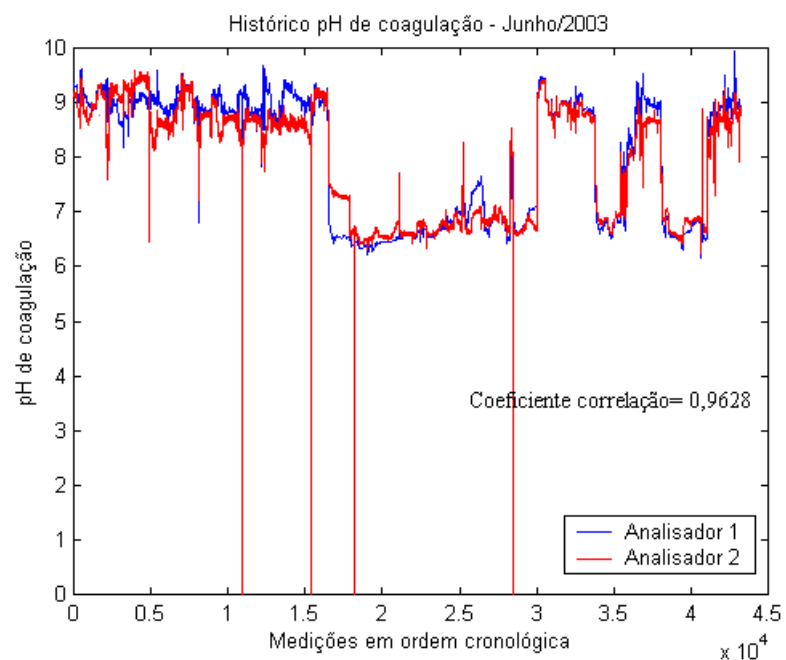


FIGURA 3.8: Série histórica temporal - Analisadores de pH - Água Coagulada

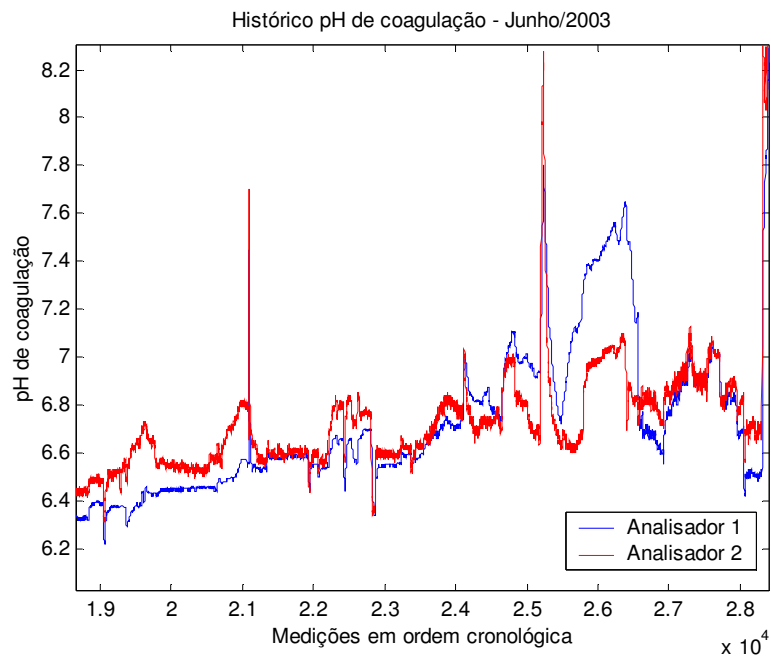


FIGURA 3.9: Série histórica temporal - Analisadores de pH - Água Coagulada - Zoom

3.4 Análise de condutividade

A análise de condutividade foi feita na água bruta, como mostrado na figura 3.10:



FIGURA 3.10: Analisador de condutividade - Água Bruta

Os resultados das análises de condutividade foram obtidos a partir de um único analisador “on line” e comparados com os resultados obtidos nas análises de laboratório, com o objetivo de verificar diariamente a existência de desvios significativos que implicassem na necessidade de intervenção para limpeza do eletrodo ou calibração do instrumento “on line”.

Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.11:

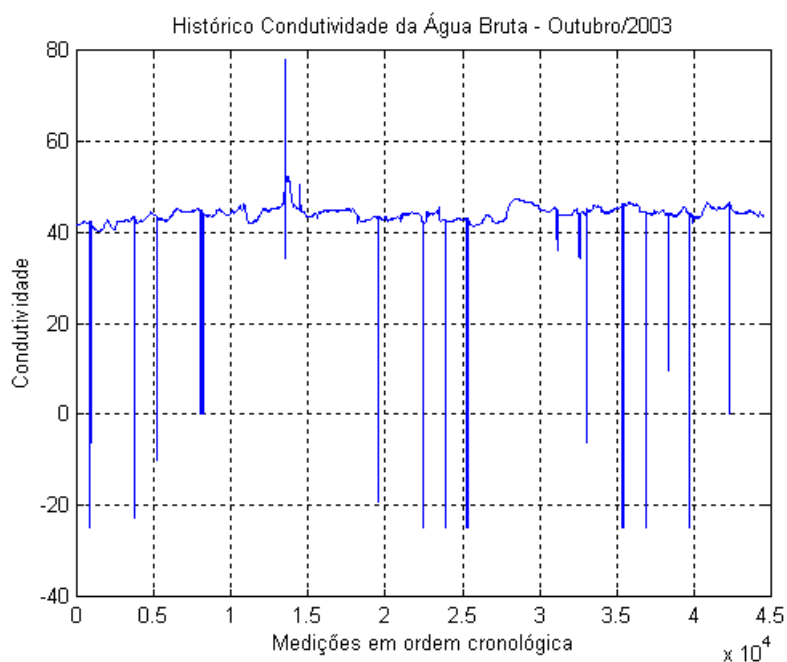


FIGURA 3.11: Série histórica temporal - Analisador de Condutividade - Água Bruta

3.5 Análise de cor

Os resultados das análises de cor são provenientes de analisadores de bancada. Este parâmetro, conforme dito anteriormente, se refere a cor verdadeira. As análises foram feitas utilizando-se centrífuga na velocidade de 3500 rpm durante 44 minutos.

3.6 Medição de vazão de água bruta

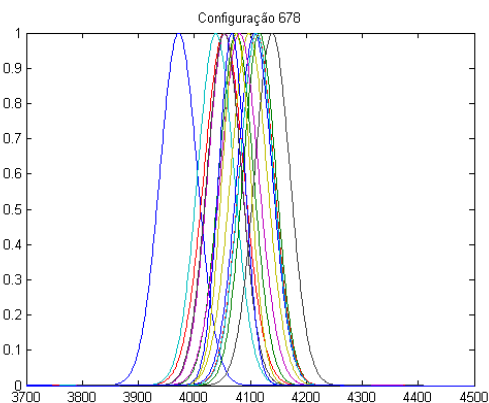
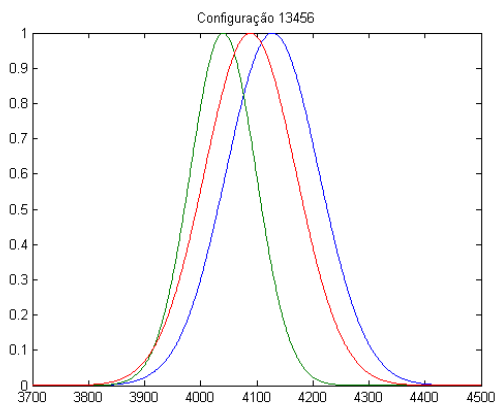
A água bruta é aduzida a ETA através de duas adutoras de 1500 mm de diâmetro, onde estão instalados dois pares de transceptores de um medidor de vazão, princípio de medição ultra sônico por tempo de trânsito.

A vazão de água bruta é um parâmetro extremamente importante na ETA, pois todos os ajustes na dosagem de produtos químicos, consideram o seu valor corrente.

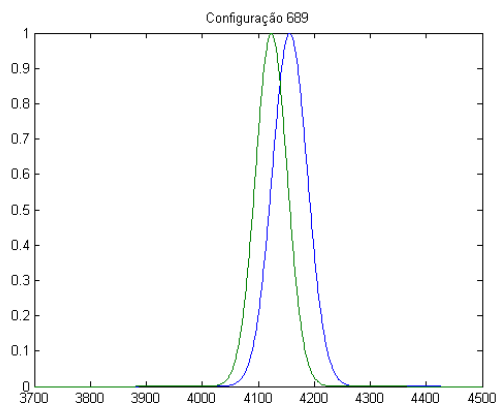
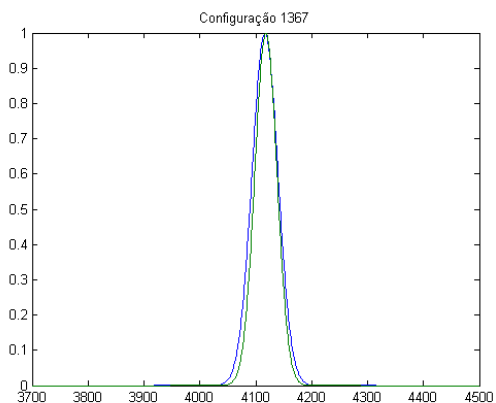
Medições de vazão em tubulações de grandes diâmetros são difíceis de avaliar, do ponto de vista de exatidão, considerando-se a ausência de um padrão de calibração. Atualmente, as empresas de saneamento utilizam o tubo de pitot, como referência. Particularmente neste medidor, já foram realizados levantamentos pitométricos para avaliação da incerteza da medição.

A água bruta é aduzida à ETA a partir de uma Estação Elevatória de Água Bruta – EAB. Na EAB existem 9 conjuntos moto bombas com vazões nominais de 750 L/s e 1500 L/s. As variações de vazão são feitas através do ligamento e desligamento dos conjuntos moto bombas, alterando assim a configuração de bombas da EAB.

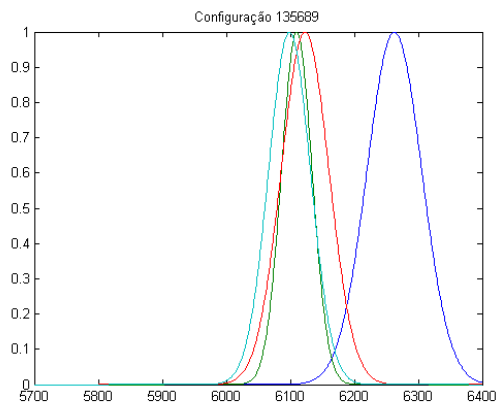
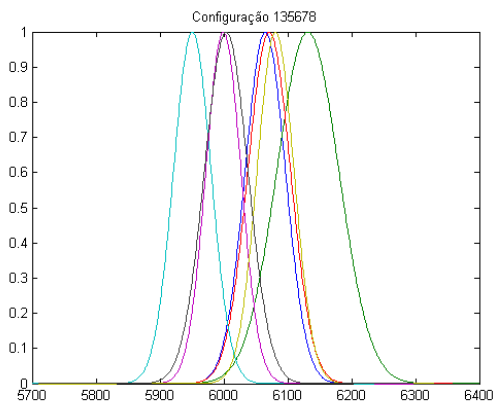
Os dados apresentados a seguir se referem à histogramas de diversas instâncias de ocorrência de uma mesma configuração de conjuntos moto bombas na EAB. Estes dados foram extraídos da base de dados criada para desenvolvimento deste trabalho, através de um programa em C++ que carrega um arquivo de dados, solicita a hora, minuto e segundo de início e término de funcionamento de uma dada configuração, monta um arquivo com os dados daquele período de tempo informado. Estes histogramas são apresentados nas figuras 3.12 a, b, c, d, e, f, g e h para dois valores típicos de vazão (4500 L/s e 6750 L/s).



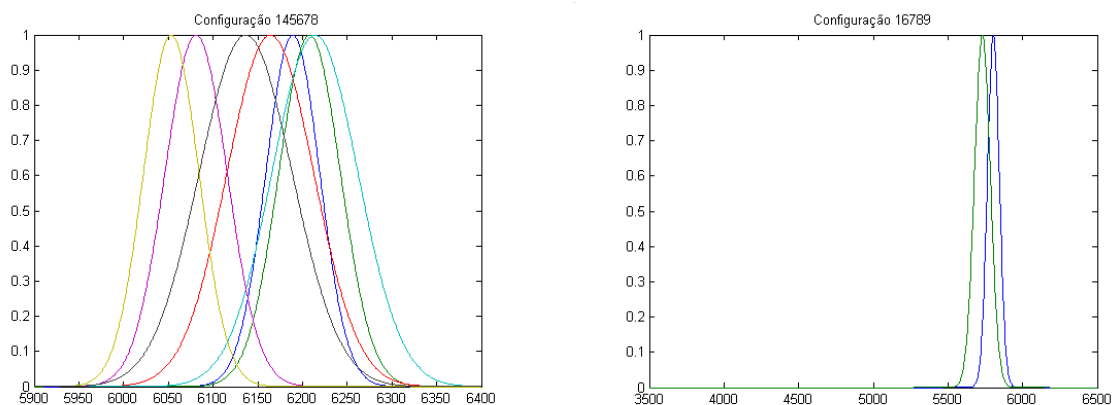
(a) Vazão nominal 4500 L/s – Configuração Moto Bombas MB-1, MB-3, MB-4, MB-5, MB-6 (b) Vazão nominal 4500 L/s - Configuração Moto Bombas MB-6, MB-7, MB-8



(c) Vazão nominal 4500 L/s – Configuração Moto Bombas MB-1, MB-3, MB-6, MB-7 (d) Vazão nominal 4500 L/s - Configuração Moto Bombas MB-6, MB-8, MB-9



(e) Vazão nominal 6750 L/s – Configuração Moto Bombas MB-1, MB-3, MB-5, MB-6, MB-7, MB8 (f) Vazão nominal 6750 L/s - Configuração Moto Bombas MB-1, MB-3, MB-5, MB-6, MB-8, MB9



(g) Vazão nominal 6750 L/s – Configuração Moto Bombas MB-1, MB-34, MB-5, MB-6, MB-7, MB-8
(h) Vazão nominal 6750 L/s - Configuração Moto Bombas MB-1, MB-6, MB-7, MB-8, MB-9

FIGURA 3.12: Histograma de Vazão de Água Bruta

Foram plotados gráficos para outras configurações de bombas totalizando vazões de 4500L/s e 6750L/s e também várias outras configurações para outros valores de vazão.

A diferença entre os valores médios para uma mesma configuração pode ser decorrente de uma série de interferências que ocorrem tais como: variações no nível do poço de sucção, posicionamento da válvula de recalque, erro devido a repetitividade e linearidade do medidor de vazão, dentre outros.

A análise da resposta do medidor de vazão teve como principal objetivo verificar a possibilidade de utilizar o sinal de saída deste medidor para se efetuar ajustes nas dosagens de produtos químicos na ETA. Considerando que:

- a medição é feita em tubulações de grandes diâmetros;
- o fluido é água bruta com presença de grande quantidade de sólidos em suspensão, o que restringe os tipos de elementos primários que podem ser utilizados;
- não é possível a realização de intervenções para instalação de sensores de vazão que requeiram a desativação da adutora por longos períodos de tempo, uma vez que o

SRV opera continuamente;

- atualmente não são alterados ajustes na dosagem de produtos químicos para variações de vazão inferiores àquelas referentes ao ligamento ou desligamento de um conjunto moto bomba de vazão nominal igual a 750 L/s,

utilizou-se o sinal de saída do medidor para implementação dos modelos desenvolvidos neste trabalho. Entretanto ficou evidente que é necessário desenvolver um estudo mais aprofundado, para segregarmos a influência das condições hidráulicas (nível no poço de sucção, ajustes de chaves de fim de curso das válvulas, etc.) do erro de medição do instrumento.

O ganho operacional obtido a partir da avaliação feita neste trabalho foi a definição de configurações preferenciais de conjuntos moto bombas na EAB, considerando aquelas que apresentam maior rendimento.

3.7 Sistema de aquisição e armazenamento de dados

O sistema de aquisição e armazenamento dos dados é constituído por vários PLC's existentes na ETA, interligados através de rede de comunicação utilizando protocolo Modbus RTU a um sistema supervisorio, também existente. Os instrumentos foram interligados a diferentes PLC's, aproveitando-se a disponibilidade de pontos de entrada analógicos reserva. Estas entradas analógicas foram associadas a tags no sistema supervisorio e através da inclusão destas tags no histórico de tendência foi possível criar a base de dados.

A funcionalidade de tendência histórica do sistema supervisorio permite a criação de um arquivo de dados para cada gráfico que pode ter até seis tags associadas. Estes gráficos permitem entre outros a configuração da taxa de amostragem e período de armazenamento. Inicialmente as tags foram configuradas para criar gráficos diários com taxa de amostragem de 1 minuto. Esta configuração foi escolhida durante o período de avaliação da instrumentação analítica por exibir com detalhes o comportamento da resposta do instrumento. A taxa de amostragem dos dados, para utilização pelos sistemas de identificação de comportamento do operador e predição da turbidez da água decantada, foi alterada posteriormente, através da análise do comportamento de cada parâmetro. O período de

armazenamento passou a ser mensal para facilitar o tratamento dos dados.

Para a organização da base de dados a ser utilizada para a modelagem, foram desenvolvidos, em linguagem de programação C++, os programas descritos nos itens 3.7.1 e 3.7.2.

3.7.1 Extração das tags dos arquivos gerados pelo sistema supervisorio

O sistema supervisorio gera arquivos que, após convertidos dentro do seu ambiente, ficam formatados conforme apresentado, parcialmente, na tabela 3.1.

TABELA 3.1: Parte de arquivo gerado pelo sistema de aquisição de dados

" " "AI	TUB- HACK "	"	"	" "AI	P	H_GLI	"	"
" " "	2000.00 "	"	"	"	"	14	"	"
" " "	0.00 "	"	"	"	"	0	"	"
" " "	NTU "	"	"	" "	"	pH	"	"
" TIME "	" VALUE	"	"	STATUS	"	"	VAL	EU
"-----"	"-----"	--"	"	-----	"	"----	---	----
"00:00:47"	10.22	"	"	GOOD	"	"	"	6.79
"00:01:47"	10.45	"	"	GOOD	"	"	"	6.8
"00:02:47"	9.46	"	"	GOOD	"	"	"	6.8
"00:03:47"	10.61	"	"	GOOD	"	"	"	6.79
"00:04:47"	10.1	"	"	GOOD	"	"	"	6.79
"00:05:47"	10.6	"	"	GOOD	"	"	"	6.79
"00:06:47"	9.54	"	"	GOOD	"	"	"	6.79
"00:07:47"	10.05	"	"	GOOD	"	"	"	6.79

Para avaliação de cada parâmetro e posterior utilização dos dados para modelagem, foi desenvolvido um programa que elimina os caracteres indesejáveis do arquivo e cria arquivos individuais para cada tag, em um formato mais conveniente, conforme mostrado na tabela 3.2. As colunas 1 a 7 do arquivo se referem respectivamente a dia, mês, ano, hora, minuto e valor do parâmetro.

TABELA 3.2: Parte de arquivo gerado pelo programa de extração de Tags

11	11	03	00	00	35.79
11	11	03	00	01	35.8
11	11	03	00	02	35.81
11	11	03	00	03	35.82
11	11	03	00	04	35.83
11	11	03	00	05	35.83
11	11	03	00	06	35.82
11	11	03	00	07	35.82
11	11	03	00	08	35.82
11	11	03	00	09	35.83
11	11	03	00	10	35.83
11	11	03	00	11	35.84
11	11	03	00	12	35.83
11	11	03	00	13	35.84
11	11	03	00	14	35.83
11	11	03	00	15	35.82
11	11	03	00	16	35.82

3.7.2 Sincronização e organização dos dados

Eventos operacionais na ETA, às vezes, impediam a continuidade de operação de algum analisador “on line”. Como consequência, criava-se um intervalo de tempo onde não existiam resultados de análises de todos os parâmetros necessários para modelagem do comportamento do operador. Desta forma foi desenvolvido um programa que considerou apenas as aquisições onde todos estes parâmetros foram coletados. O programa contém uma árvore binária que ordena os valores das variáveis pelo instante de tempo quando foram coletadas e insere em um arquivo final os registros que apresentarem valores para todas as variáveis.

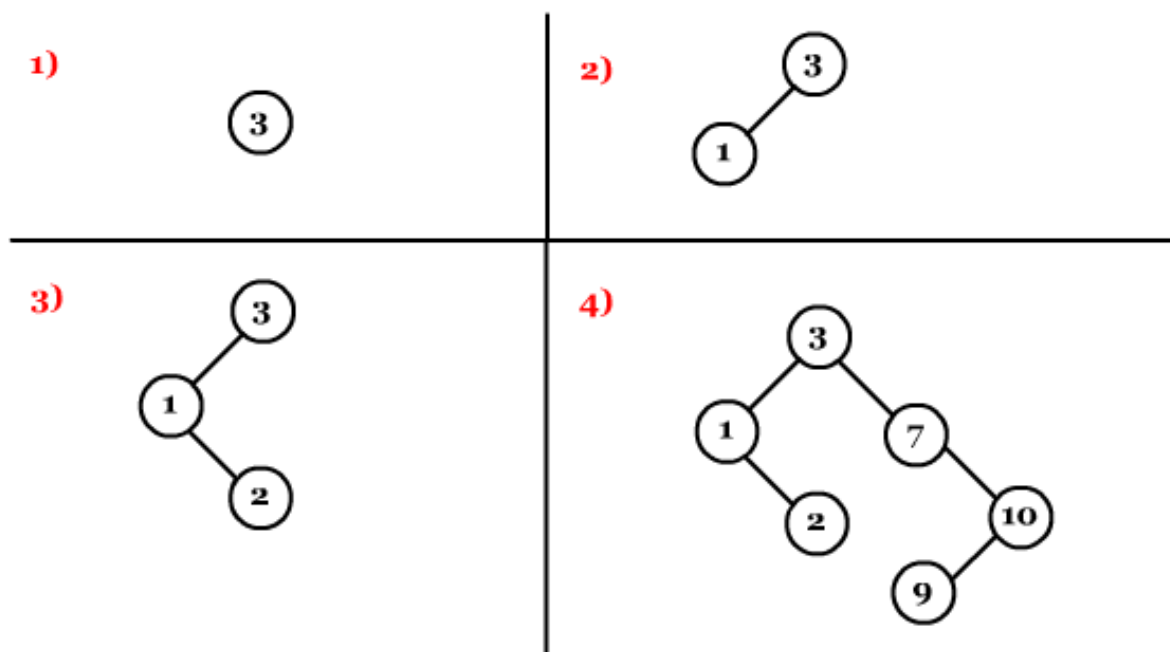


FIGURA 3.13: Árvore binária

Os dados são inseridos conforme mostrado na figura 3.13, ou seja, o dado mais antigo é inserido à esquerda e o mais recente, à direita. A leitura é feita da esquerda para a direita, partindo da extremidade inferior, criando assim, o arquivo ordenado.

Este programa carrega os arquivos gerados no programa de extração das tags e gera um arquivo com os parâmetros utilizados na identificação do comportamento do operador e predição da turbidez da água decantada. Os parâmetros são: condutividade, pH de coagulação, turbidez, dosagem, tipo de coagulante, vazão, cor e turbidez da água decantada e são ordenados conforme apresentado na tabela 3.3.

TABELA 3.3: Parte de arquivo gerado pelo programa de sincronização dos dados

39.12	6.33	60.08	12.16	1	4655.79	25	2.11
39.12	6.3	60.5	12.14	1	4617.74	25	2.11
39.11	6.28	60.51	11.29	1	4626.97	25	2.12
39.1	6.27	60.3	10.57	1	4585.31	25	2.15
39.1	6.33	60.12	10.53	1	4636.05	25	2.2
39.12	6.35	60.06	10.53	1	4628.2	25	2.23
39.1	6.34	60.81	10.55	1	4643.38	25	2.2
39.09	6.34	60.27	10.52	1	4634.98	25	2.15
39.11	6.34	60.11	10.54	1	4608.36	25	2.15
39.16	6.34	60.03	10.57	1	4624.03	25	2.1
39.19	6.36	59.99	10.53	1	4630.19	25	2.11
39.12	6.35	59.93	10.54	1	4562.25	25	2.11
39.12	6.35	60.22	10.52	1	4586.51	25	2.11
39.12	6.37	60.17	10.54	1	4594.69	25	2.06
39.2	6.35	60.56	10.54	1	4639.89	25	2.08

O desenvolvimento destes programas foi de grande importância para montagem da base de dados, considerando a grande quantidade de dados coletados. Para cada parâmetro foram coletados aproximadamente 290 dados diários. O período de coleta foi de 1 (um) ano, totalizando aproximadamente 630 000 dados.

Capítulo 4

Metodologia Utilizada para Desenvolvimento do Trabalho

4.1 Introdução

O desenvolvimento dos sistemas para identificação do comportamento do operador e predição de perda turbidez da água decantada em uma ETA envolveu a construção de modelos a partir da construção de uma base de dados coletados no período de janeiro de 2003 à fevereiro de 2004. Para a construção destes modelos foi utilizada técnica de modelagem paramétrica, baseado em abordagem fuzzy e Redes Neurais Artificiais – RNAs, devido a alta complexidade e a falta de conhecimento profundo do processo.

4.2 Preparação dos dados

A análise dos dados tem como objetivo identificar as variáveis relevantes na determinação da dosagem de coagulante e na predição turbidez da água decantada. Estas variáveis serão utilizadas como entradas das Redes Neurais Artificiais, nas etapas de treinamento e validação.

Segundo Di Bernardo [15], as variáveis de interesse no processo de coagulação são várias, dentre elas pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez, temperatura, força iônica, sólidos totais dissolvidos, tamanho e distribuição de tamanho das partículas em estado coloidal e em suspensão. Muitas destas variáveis apresentam um grau de dificuldade grande na determinação de seus valores, seja por não haver uma técnica de medição “on line”

disponível, seja por implicarem na utilização de instrumentos ainda não utilizados tradicionalmente nas companhias de saneamento, no Brasil.

De acordo com trabalhos já desenvolvidos [9], [12], [17], [33], [46], [47] e analisando os procedimentos operacionais atualmente sendo utilizados na ETA do Rio das Velhas verificou-se que as seguintes variáveis são consideradas para fazer o ajuste da dosagem de coagulante:

- Vazão de água bruta
- Turbidez da água bruta
- Cor verdadeira da água bruta
- Condutividade da água bruta
- pH da água coagulada
- Tipo de coagulante (densidade e concentração)

Na ETA do Rio das Velhas, para avaliar a eficiência do ajuste da dosagem, o operador efetua a análise da turbidez da água decantada.

O comportamento do operador ao controlar o sistema de coagulação é similar a um controle em malha aberta, pois a ação de controle é definida apenas nos parâmetros de entrada do sistema. No caso da ETA do Rio das Velhas esse comportamento poderia ser representado da forma mostrada na figura 4.1

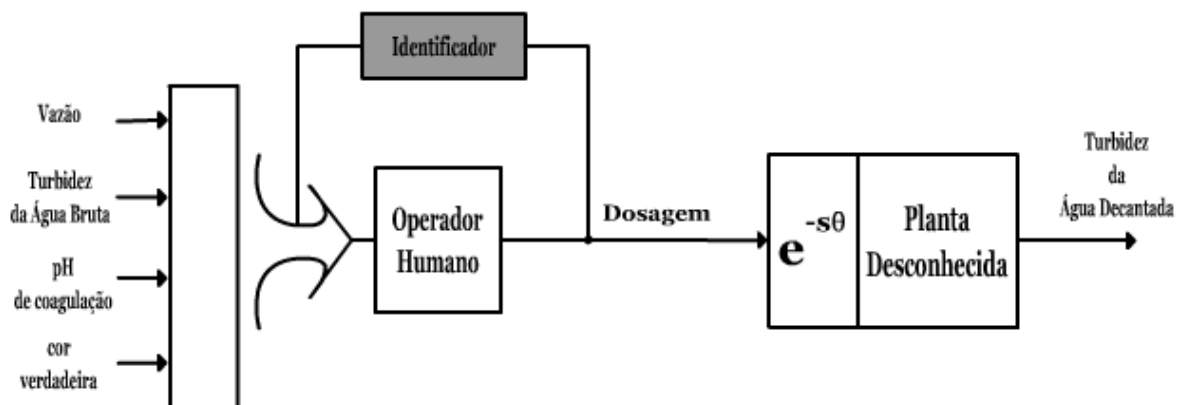


FIGURA 4.1: Identificação do comportamento do operador

Para se conseguir fechar a malha é necessário obter uma predição da saída do sistema, visto que existe um tempo morto entre a ação de controle e a efetiva reação do sistema.

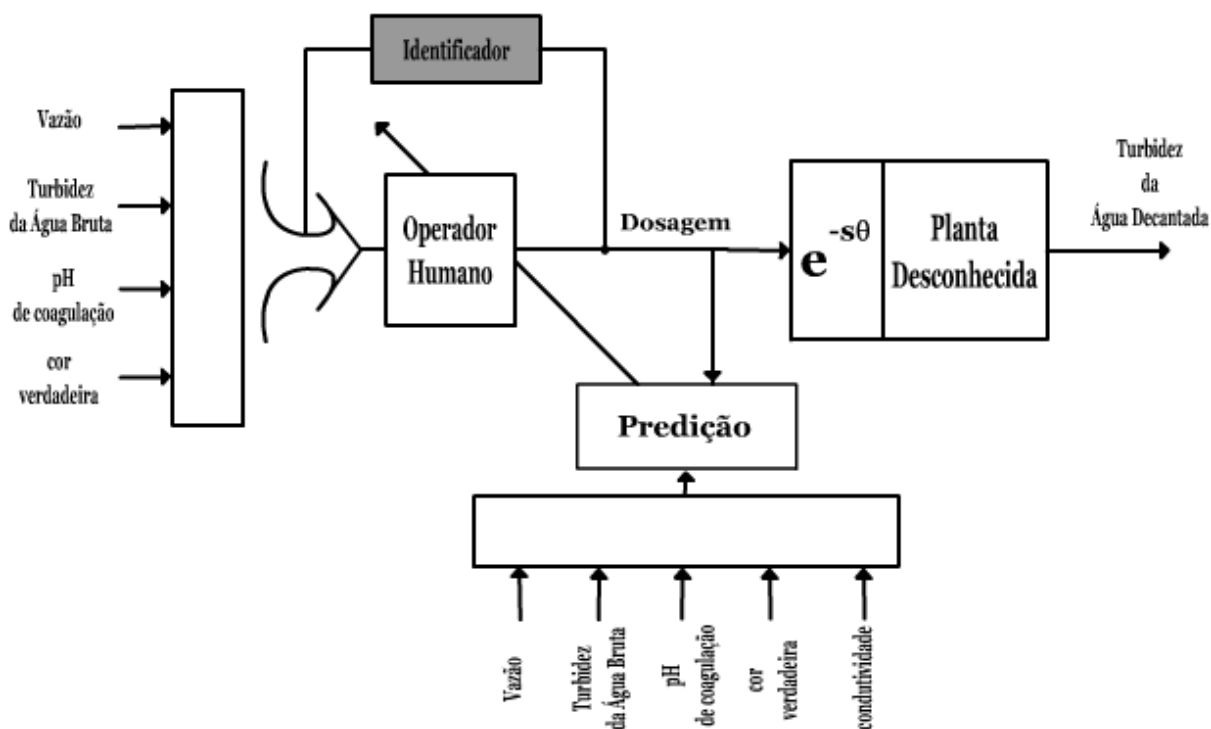


FIGURA 4.2: Predição da Turbidez da Água Decantada

As alternativas para a identificação dos sistemas envolvidos no processo de coagulação (controle da dosagem de coagulante baseado no conhecimento do operador e predição da turbidez da água decantada a partir das entradas da planta) são a construção de modelos lineares ou não-lineares. A adoção de uma técnica de modelagem linear implicaria em um modelo multi-variável e de alta complexidade. Além disso, a representação desses sistemas a partir de resposta ao impulso não é possível devido ao acoplamento natural das variáveis de entrada e também ao fato desses impulsos interferirem na operação da ETA que não pode ter seu processo produtivo perturbado ou interrompido. Portanto optou-se por uma abordagem de identificação baseada em técnicas de inteligência computacional.

Desta maneira cria-se, no momento, uma ferramenta de auxílio ao operador, que ao alterar a dosagem, terá a informação da turbidez da água decantada estimada, podendo efetuar

intervenções no processo para melhorar a qualidade da água decantada. Ao identificar o comportamento do operador quando controlando a dosagem de coagulante é possível fornecer referências para ajuste da dosagem, para as diferentes condições do processo. Tais modelos poderão também ser utilizados em uma estratégia para se efetuar o controle automático da dosagem de coagulante.

4.3 Identificação e eliminação de erros grosseiros nos dados

Antes de se utilizar os dados coletados para modelagem, a partir da observação da resposta dos instrumentos, verificou-se a necessidade de se efetuar o tratamento dos dados brutos.

Sabe-se que são várias as possíveis fontes de geração de erros em dados de processo. Particularmente, nos instrumentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, foram identificadas situações de mal funcionamento do sistema de amostragem e do próprio instrumento que invalidam o dado, tornando-o impróprio para utilização para fins de modelagem e controle automático.

Nos turbidímetros, por exemplo, a entrada de ar na célula de medição provoca uma variação brusca na resposta do instrumento que passa a apresentar valores de turbidez muito maiores que os valores reais. A entrada de materiais, tal como folhas, provoca a obstrução da entrada da amostra no instrumento, reduzindo a vazão de entrada a valores inferiores àqueles requeridos, comprometendo portanto, a resposta do instrumento.

No caso do medidor de vazão de água bruta que opera pelo princípio de medição por ultrassom – tempo de trânsito, a passagem de sólidos em suspensão de dimensões consideráveis através dos transceptores, faz com que ocorram variações bruscas na resposta do medidor.

Outras interferências foram observadas, em outros instrumentos, inclusive, sendo algumas comuns a instrumentos que medem um mesmo parâmetro com características de implementação diferentes, outras dependentes da implementação adotada pelos diversos fabricantes e ainda aquelas provenientes do sistema de aquisição de dados, mostrando a necessidade de se efetuar testes para verificar a consistência dos dados de processo. É importante, portanto, a adoção de alguma metodologia para a detecção e posterior eliminação

de possíveis erros grosseiros presentes entre os dados de processo, antes de sua utilização efetiva. A estratégia utilizada em cada caso foi definida analisando a característica dos dados históricos de cada parâmetro medido.

A metodologia adotada, baseada em técnicas de processamento de sinais, considera:

- a faixa de valores típicos de cada parâmetro para a época do ano em questão (período seco ou chuvoso);
- a definição da taxa de variação máxima, considerando a taxa de amostragem;
- filtro de média móvel, para minimizar variações bruscas devidas a interferências nos sistemas de medição.

Estes critérios foram utilizados para validar os dados usados para modelagem e também na implementação feita em linguagem de programação C++, dos sistemas de predição da turbidez da água decantada e identificação do comportamento do operador, implantados na ETA.

As figuras 4.3 e 4.4 apresentam os gráficos correspondentes aos dados brutos e validados.

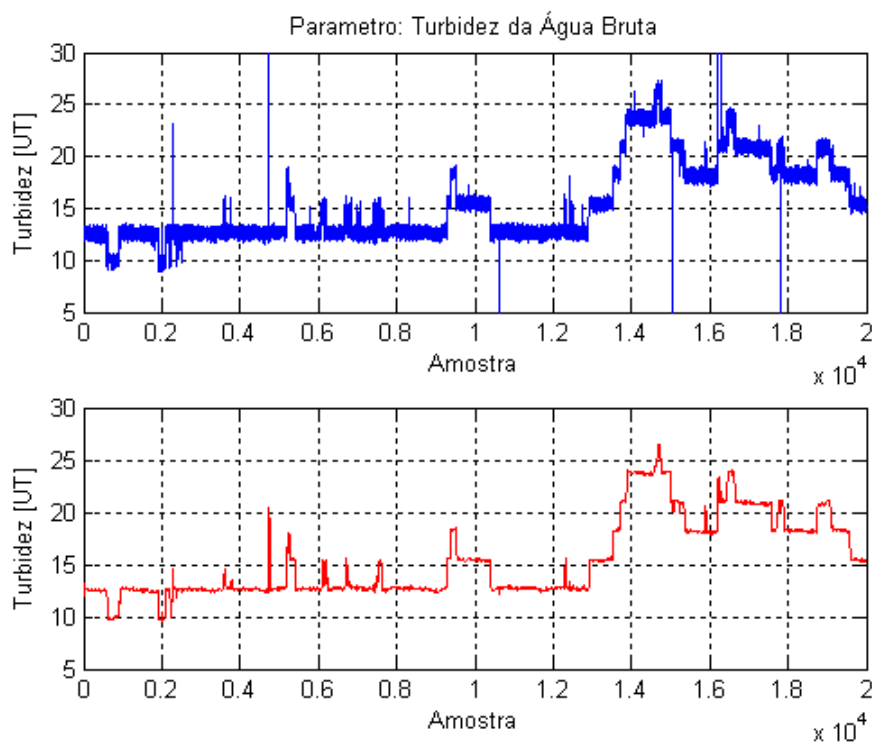


FIGURA 4.3: Validação de dados - Turbidez da Água Bruta

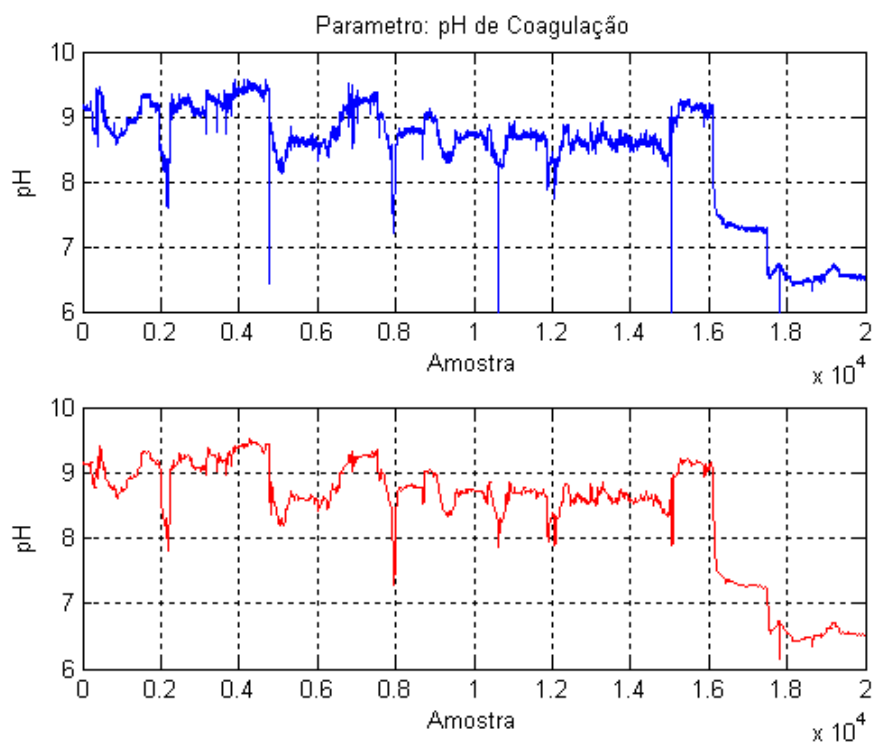


FIGURA 4.4: Validação de dados - pH de coagulação

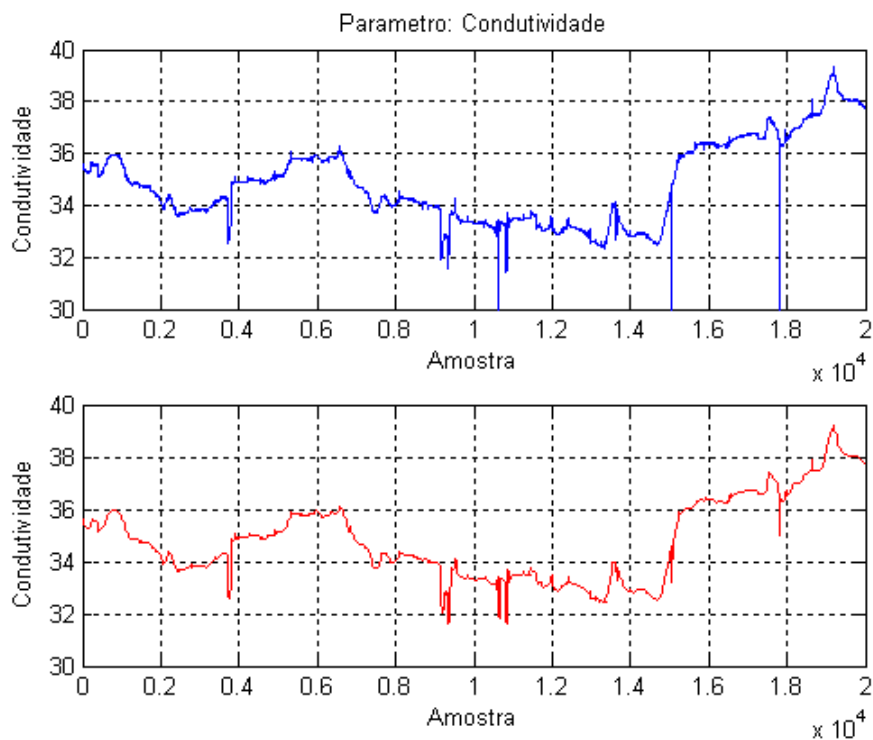


FIGURA 4.5: Validação de dados - Condutividade

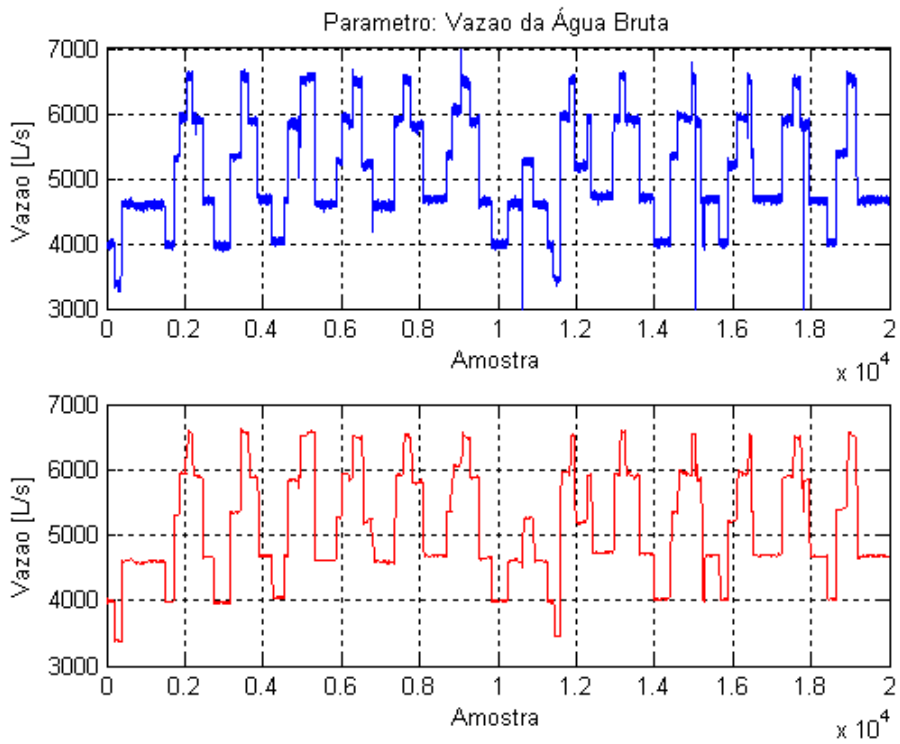


FIGURA 4.6: Validação de dados - Vazão Água Bruta

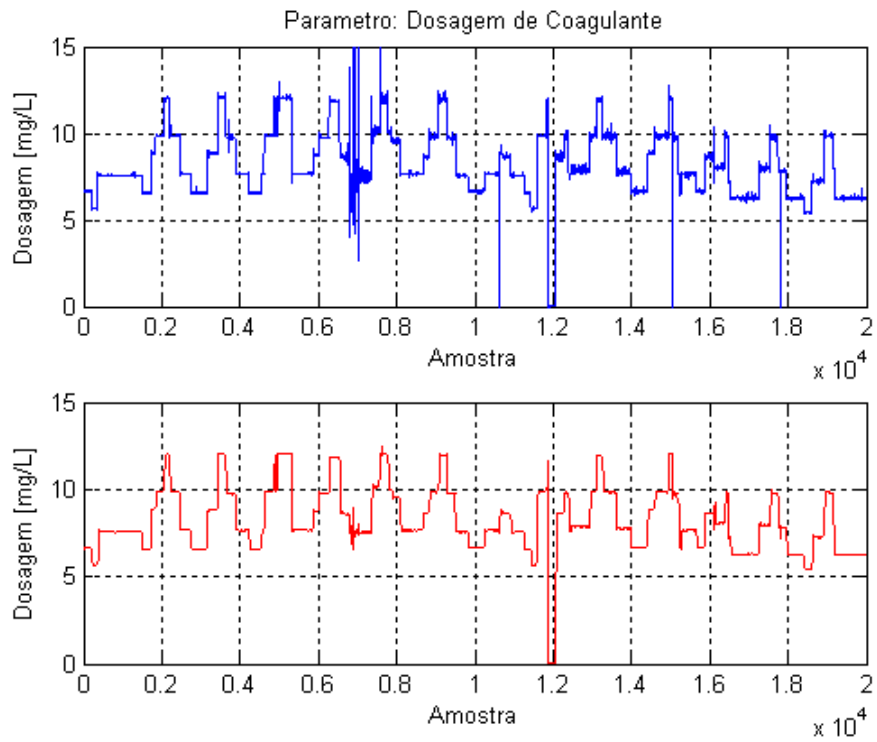


FIGURA 4.7: Validação de dados - Dosagem

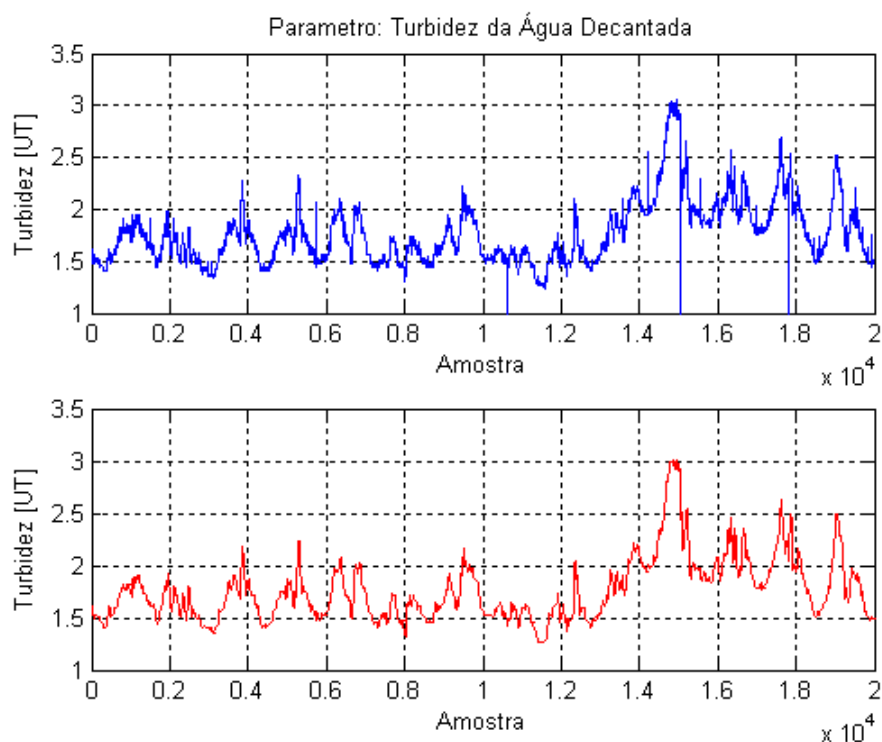


FIGURA 4.8: Validação de dados - Turbidez Água Decantada

A cor verdadeira, obtida através de análise em laboratório, por ser um dado de entrada manual do sistema não foi validada, considerando que o operador ao editar o valor, já faz a validação.

Considerando portanto, os procedimentos operacionais adotados na ETA, foram avaliadas as relações entre as variáveis do processo utilizando-se métodos não paramétricos, através de gráficos de correlação cruzada. Os resultados serão utilizados na determinação de modelos paramétricos para identificação e predição.

4.4 Correlação das variáveis para determinação dos parâmetros que serão utilizados como entradas das Redes Neurais

Analisando-se as correlações das variáveis do processo de coagulação, pode-se identificar, de uma forma adequada, quais delas podem compor as entradas das RNAs que farão a identificação do comportamento do operador e a predição da turbidez da água decantada. No modelo referente à identificação do comportamento do operador, a saída será o valor da

dosagem e no modelo para predição a saída será a turbidez da água decantada. A função de correlação cruzada entre dois sinais $u(t)$ e $y(t)$ é definida como:

$$\text{corr}(\tau, t) = E[u(t)y_s(t + \tau)] \quad (4.1)$$

$$\text{corr}_{y_s}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N + 1} \sum_{i=N}^N u(i)y_s(i + \tau) \quad (4.2)$$

Nestas equações u é uma variável de entrada, y é a variável de saída, E é a esperança matemática, τ é o atraso, t é o tempo e N é o número de pontos que compõem o conjunto de dados das variáveis [1].

Utilizou-se a rotina do MATLAB denominada `crosscorr.m` para gerar os gráficos de correlação cruzada, na qual as equações 4.1 e 4.2 são implementadas. A partir dos gráficos de correlação cruzada foi feita uma análise com o objetivo de verificar se há relação entre as variáveis, a forma direta ou inversa como elas se relacionam e o tempo morto do processo.

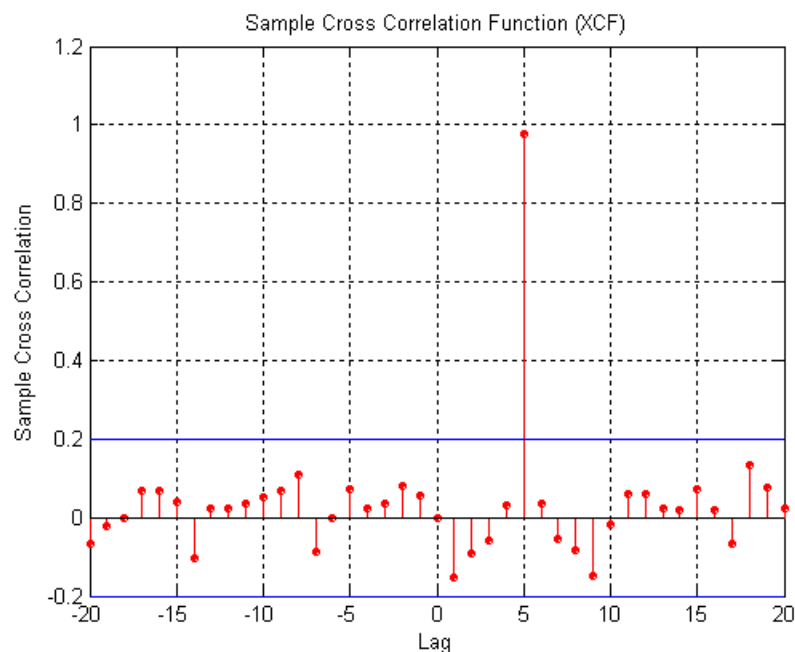


FIGURA 4.9: Correlação cruzada de um sinal aleatório com ele mesmo atrasado de 5 amostras

Para exemplificar o procedimento de análise de correlação foi gerado um sinal aleatório e posteriormente esse sinal foi atrasado. Devido a natureza do próprio sinal o único ponto de correlação diferente de zero é quando o sinal se sobrepõe. Na figura 4.9 o sinal foi atrasado de 5 amostras e aplicada a função de correlação cruzada entre o sinal original e o sinal atrasado. Como pode ser verificado, o único ponto em que a correlação não é desprezível corresponde ao instante onde os sinais estão novamente sincronizados, possibilitando identificar, dessa forma, que há correlação e que o atraso aplicado no sinal original é de 5 amostras. As faixas limitadoras presentes na figura 4.9 correspondem ao intervalo de confiança, ou seja, abaixo de tais valores a correlação é considerada desprezível.

Sendo assim, as seguintes questões podem ser respondidas a partir da análise dos gráficos de correlação:

1. Quais são as variáveis que influenciam o valor corrente da dosagem e da turbidez da água decantada?
2. Qual a influência do valor atual e dos valores passados das variáveis no valor atual da dosagem e da turbidez da água decantada?

Para definição das entradas das RNAs e RNF analisou-se os gráficos de correlação cruzada da dosagem de coagulante e da turbidez da água decantada com as outras variáveis do processo.

É necessário salientar que estão sendo desenvolvidos 2 modelos:

1. Modelo para identificação do comportamento do operador baseado nas entradas atuais da planta.
2. Modelo para predição da turbidez da água decantada baseado nas entradas e saída da planta, que inclui o controlador (operador humano) e a dinâmica da planta.

Vale ressaltar que devido a impossibilidade de interrupção ou inserção de perturbações no processo a modelagem da predição da turbidez da água decantada está sendo feita com a planta em malha fechada.

4.5 Análise de correlação para as variáveis de entrada do modelo para identificação do comportamento do operador

Os gráficos das figura 4.10 mostram que há correlação da dosagem com a cor verdadeira, a turbidez e a vazão da água bruta e também com o pH de coagulação e a turbidez da água decantada. Não há correlação da dosagem com a condutividade da água bruta. Especialmente a correlação com a vazão de água bruta mostrou que essa está adiantada em relação à dosagem de 10 amostras, o que corresponde a 10 minutos pois a amostragem dos dados é feita de 1 em 1 minuto. Foram determinadas também as correlações das variáveis do processo entre si, conforme tabela 4.1.

Tabela 4.1: Correlação entre as variáveis de entrada

Relação	Valor máximo de correlação
Cor x Condutividade	0.098063
Cor x Turb. Bruta	0.827028
Cor x Vazão	0.132049
Cor x pH	0.193765
Condutividade x Turb. Bruta	0.270018
Condutividade x Vazão	0.031672
Condutividade x pH	0.190874
Turb. Bruta x Vazão	0.131320
Turb. Bruta x pH	0.280849
Vazão x pH	0.087411

Observa-se um acoplamento entre algumas variáveis do processo. Este fato pode ser utilizado para simplificação do modelo, considerando a existência de possível redundância entre os parâmetros utilizados pelo operador atualmente. Entretanto, para implementação do modelo atual, não será feita a simplificação. Desta forma são definidas como variáveis que compõem a base de conhecimento do sistema neuro-fuzzy para identificação do comportamento do operador, aquelas variáveis que apresentam correlação com a dosagem, ou seja, cor verdadeira, turbidez e vazão da água bruta pH de coagulação e turbidez da água decantada.

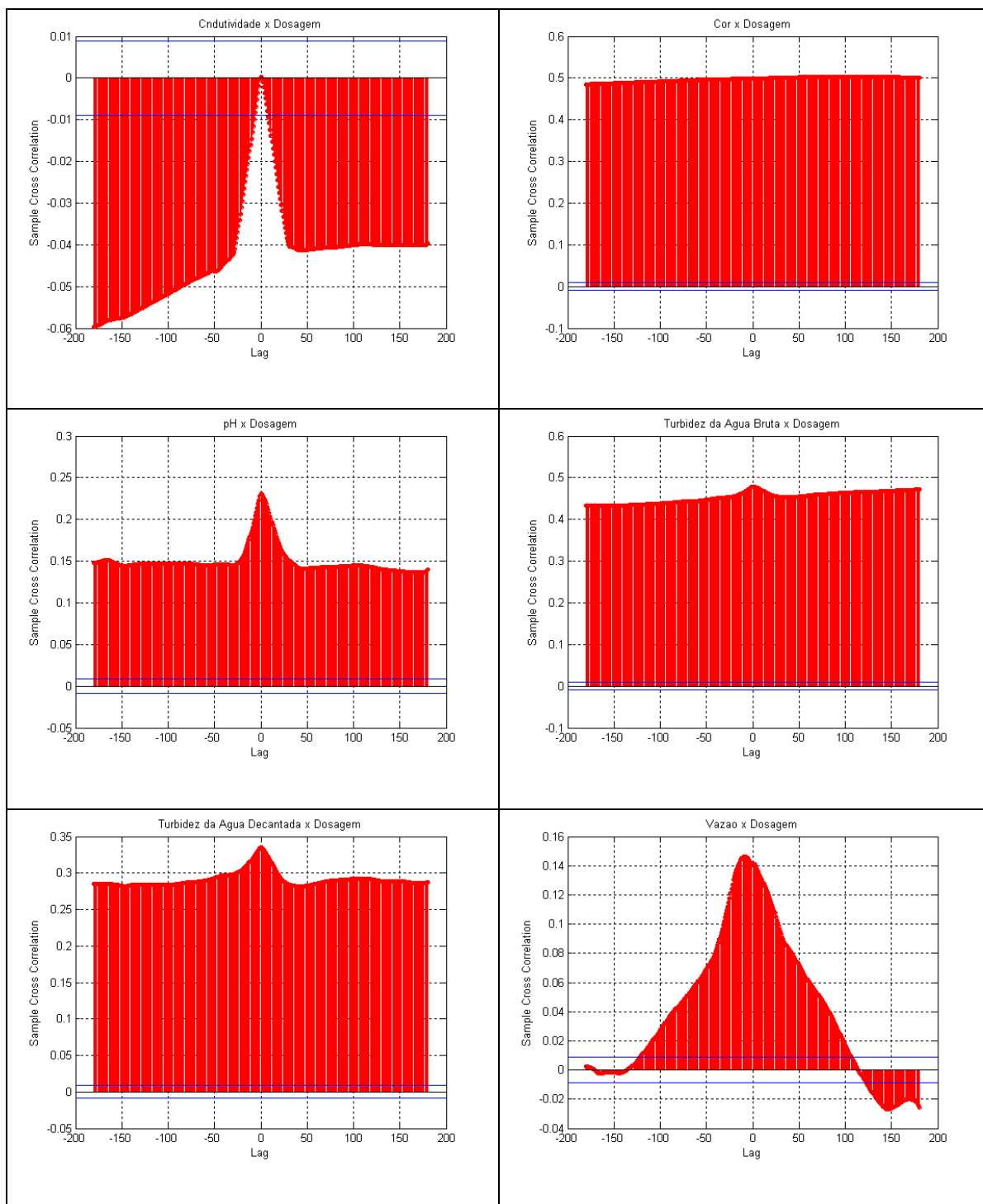
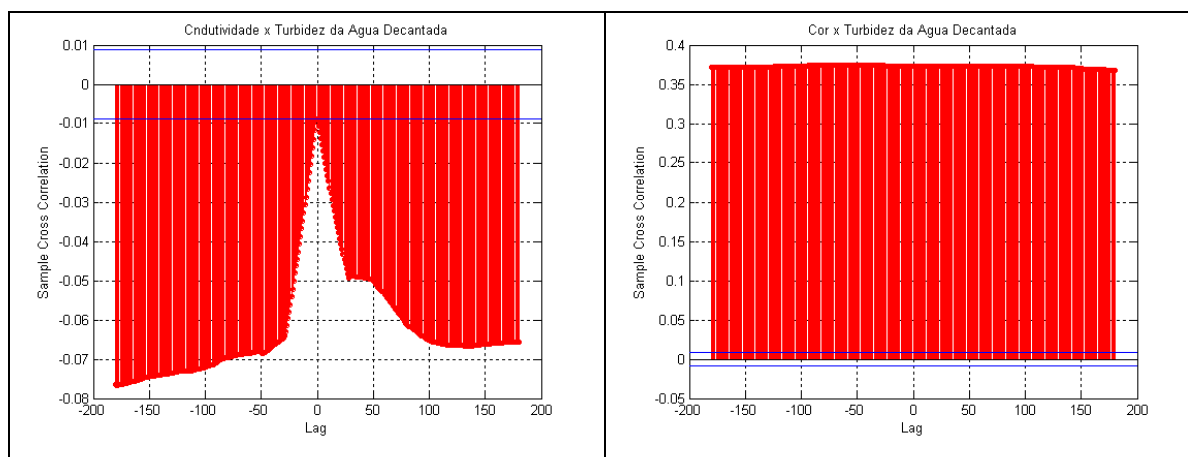


FIGURA 4.10: Correlação cruzada da dosagem com as variáveis do processo

4.6 Análise de correlação para as variáveis de entrada do modelo para predição da turbidez da água decantada

Os gráficos da figura 4.11 mostram que há correlação da turbidez da água decantada com a cor verdadeira, a turbidez da água bruta, o pH de coagulação e a dosagem. Não há correlação da turbidez da água decantada com a condutividade e a vazão da água bruta.

Com relação à vazão é sabido que variações dessa variável interferem na turbidez da água decantada, visto que as dosagens de coagulante são feitas em função da vazão de água bruta. O resultado obtido a partir do gráfico de correlação cruzada pode então ser justificado considerando que, como a modelagem está sendo realizada em malha fechada, o operador tem conseguido praticamente eliminar a influência da vazão na turbidez da água decantada. Com relação às variáveis cor, turbidez da água bruta e pH, como era de se esperar, existe a correlação que está evidenciada nos gráficos mostrando que as ações do operador não são suficientes para eliminar a interferência desses parâmetros na turbidez da água decantada, uma vez que a planta encontrava-se operando em malha fechada quando foram feitas as coletas dos dados. A dosagem necessariamente deverá apresentar correlação com a saída por ser a variável manipulada que evitará interferências dos parâmetros de entrada na saída. A condutividade, considerando as referências bibliográficas, será utilizada como variável de entrada da rede, apesar de não ter apresentado correlação.



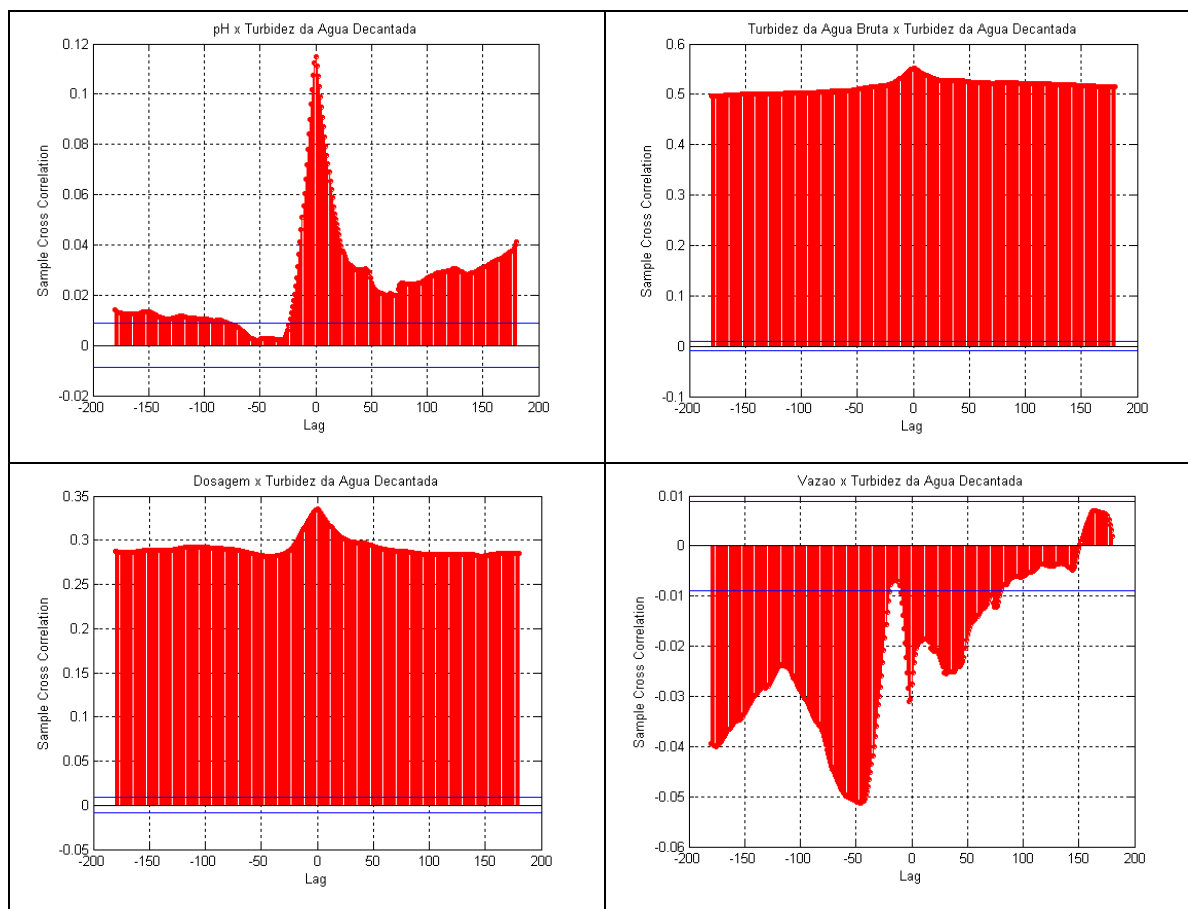


FIGURA 4.11: Correlação cruzada da turbidez da água decantada com as outras variáveis do processo

Assim são definidas como variáveis que comporão a base de conhecimento do sistema para predição da turbidez da água decantada, aquelas variáveis que apresentam correlação com a turbidez da água decantada, ou seja, cor verdadeira e turbidez da água bruta, pH de coagulação e dosagem. A vazão e a condutividade da água bruta também serão consideradas devido aos motivos expostos anteriormente. Para generalizar o modelo, será considerado o tipo de coagulante expresso por sua concentração e densidade.

4.7 Modelagem

Em seus trabalhos, Pereira [37] e Souza [43] apresentam as modelagens realizadas para o sistema de predição da turbidez da água decantada. Foram desenvolvidos vários modelos, efetuando-se variações nos parâmetros e na topologia da RNA.

TABELA 4.2: Histórico das tentativas para obtenção do modelo para predição da turbidez da água decantada

MODELO IMPLEMENTADO	ESTRUTURA	ENTRADAS UTILIZADAS
<ul style="list-style-type: none"> Modelo Preliminar baseado em uma MLP; 	<ul style="list-style-type: none"> 1 RNA com 10 entradas, 15 nós na camada escondida. 	<ul style="list-style-type: none"> Turbidez da água bruta, condutividade, vazão, pH, dosagem e seus respectivos valores a 30 min atrás além do tipo de coagulante utilizado.
<ul style="list-style-type: none"> Remodelagem da tentativa anterior; 	<ul style="list-style-type: none"> 1 RNA com 10 entradas, 25 nós na camada escondida. 	<ul style="list-style-type: none"> Turbidez da água bruta, condutividade, vazão, pH, dosagem e seus respectivos valores a 30 min atrás além do tipo de coagulante utilizado.
<ul style="list-style-type: none"> Comitê de modelos com seletor simples; 	<ul style="list-style-type: none"> 2 RNAs com 10 entradas, 25 nós na camada escondida utilizando a turbidez da água bruta como parâmetro de seleção do modelo. 	<ul style="list-style-type: none"> Turbidez da água bruta, condutividade, vazão, pH, dosagem e seus respectivos valores a 30 min atrás além do tipo de coagulante utilizado.

<ul style="list-style-type: none"> • Comitê de modelos com seletor baseado no algoritmo LVQ; 	<ul style="list-style-type: none"> - 2 RNAs com 5 entradas, 25 nós na camada escondida utilizando o algoritmo LVQ com a turbidez da água bruta e a cor verdadeira como parâmetros de seleção do modelo 	<ul style="list-style-type: none"> - Turbidez da água bruta, condutividade, vazão, pH, dosagem e seus respectivos valores a 30 min atrás além do tipo de coagulante utilizado.
<ul style="list-style-type: none"> • Estrutura Neuro-fuzzy com treinamento on-line; 	<ul style="list-style-type: none"> - Rede Yamakawa (estrutura?????) 	<ul style="list-style-type: none"> - Turbidez da água bruta, condutividade, vazão, pH, dosagem, a turbidez da água decantada e seus respectivos valores a 1:30 min atrás.

4.8. Remodelagem do sistema para predição da turbidez da água decantada

Tentando obter um melhor resultado em campo, foi desenvolvido um novo modelo para predição da turbidez da água decantada na próxima 1:30 horas, incorporando componentes atrasadas do sinal de saída à entrada da rede. Novos dados foram coletados durante os meses de janeiro e fevereiro de 2004. Devido à dinâmica das variáveis de entrada ser consideravelmente lenta e o tempo computacional gasto para o treinamento da rede ser alto, o tempo de amostragem foi aumentado para 15 minutos. Os critérios para validação dos dados não foram alterados, com relação aqueles utilizados por Pereira [37] e Souza [43], permanecendo a validação por limite de faixa, taxa de variação e média móvel para todas as entradas (condutividade, pH, vazão, turbidez da água bruta e dosagem), exceto a vazão e a dosagem que não foram validadas por média móvel. Para obtenção deste novo modelo

realizou-se o treinamento de uma rede MLP com aproximadamente 2400 dados.

Utilizou-se a topologia de 15 nodos na camada escondida. As entradas utilizadas foram cor, turbidez da água bruta, vazão, pH da água coagulada e dosagem no instante atual, turbidez da água bruta, vazão e dosagem atrasadas de seis períodos de amostragem (o equivalente a 1:30h) e a própria saída (turbidez da água decantada) atrasada no tempo de diversos períodos de amostragem (o equivalente a 1:30h, 1:45h, 2:00h, 2:15h, 2:30h e 2:45h). Este atraso foi definido em função da estrutura física da ETA que introduz, na condição de máxima vazão, um tempo morto entre a ação tomada pelo operador no ponto de dosagem de coagulante e a reação no ponto de coleta onde é feita a análise da turbidez da água decantada de aproximadamente uma hora e trinta minutos.

O treinamento foi feito “off line” utilizando-se o Matlab. Para o treinamento utilizou-se $\frac{3}{4}$ da massa de dados. A rede foi treinada repetidas vezes, até obter-se um modelo com menor erro e baixo desvio padrão, entre a saída do modelo e a turbidez da água decantada medida, conforme mostrado no histograma da figura 4.13. A validação do modelo obtido foi feita com o restante da massa de dados. Os resultados são apresentados nas figura 4.12 .

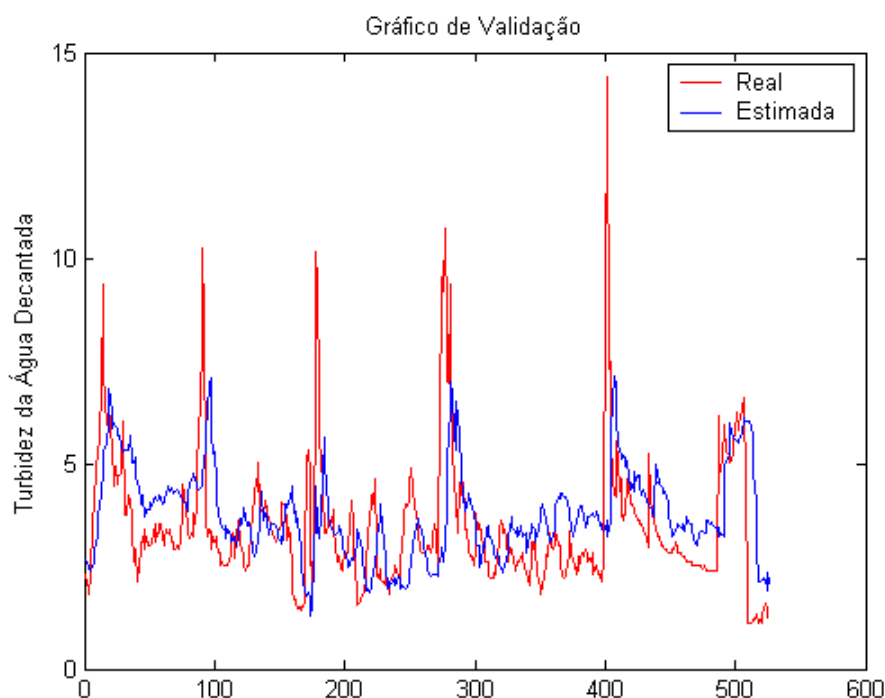


FIGURA 4.12: Validação do modelo para predição da turbidez da água decantada

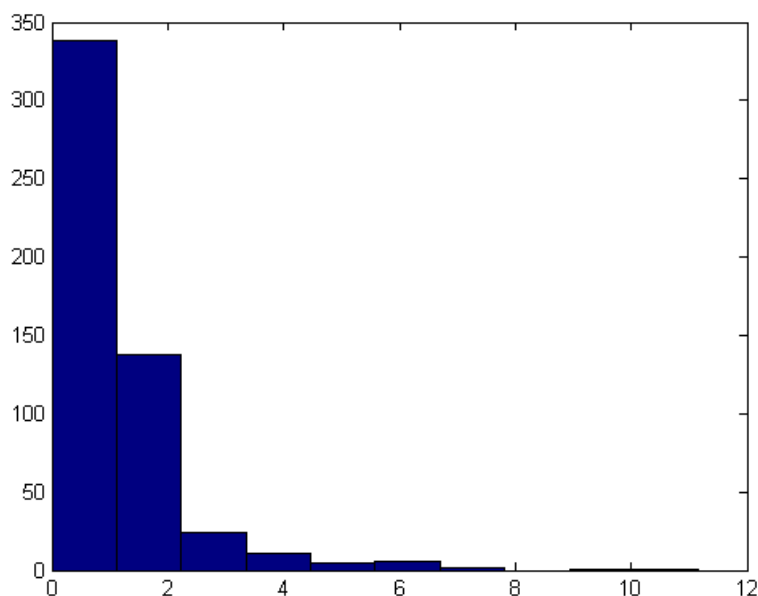


FIGURA 4.13: Validação do modelo – Histograma do erro entre a saída real e a previsão

Os parâmetros do modelo (pesos da camada de entrada, pesos da camada escondida e os termos de polarização) foram utilizados para implementação “on line”, nas instalações da ETA.

4.9 Modelagem do sistema para identificação do comportamento do operador

Para a modelagem do sistema para identificação do comportamento do operador, quando efetuando o controle da dosagem de coagulante, utilizou-se da mesma base de dados do sistema de previsão da turbidez da água decantada e dos gráficos de correlação cruzada apresentados na figura 4.10.

A previsão da turbidez da água decantada, nesse momento, não será inserida como entrada do modelo Neuro-Fuzzy, pois o operador atualmente não utiliza essa informação para realizar a dosagem. A previsão será inserida como informação para o operador visando melhorar o

desempenho do processo de coagulação e conseqüentemente gerar uma nova base de dados que será útil na remodelagem do sistema de identificação do comportamento do operador. A predição também é um recurso de grande valia no caso de falha em algum medidor, funcionando como estimador da turbidez da água decantada.

Para modelagem do comportamento do operador foi utilizada a estrutura ANFIS, descrita no apêndice, para tentar extrair da base de dados o conjunto de regras que represente esse comportamento com o mínimo de erro possível. A saída da rede é uma função dos graus de pertinência das entradas em um determinado instante.

O resultado do treinamento é apresentado nas figuras 4.14.

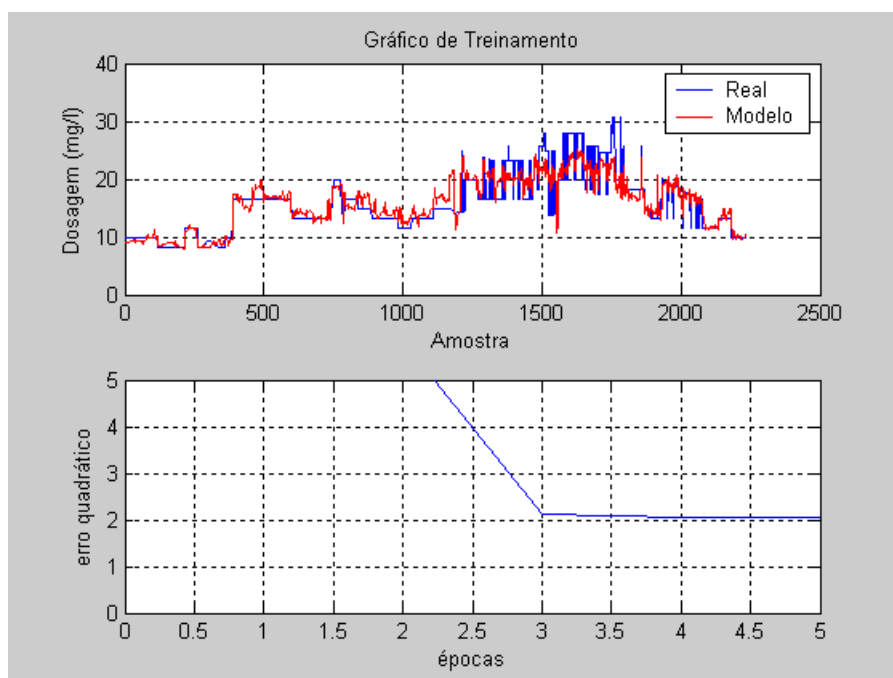


FIGURA 4.14: Resultados do treinamento para identificação do comportamento do operador

Os resultados da validação do modelo e o histograma do erro de validação são apresentados nas figuras 4.15 e 4.16.

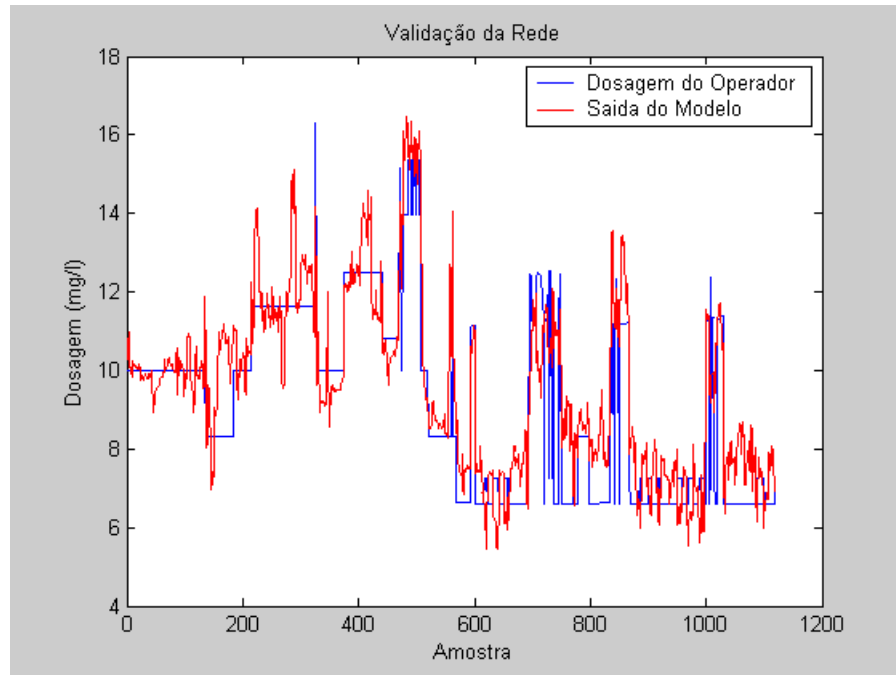


FIGURA 4.15: Validação do modelo para identificação do comportamento do operador

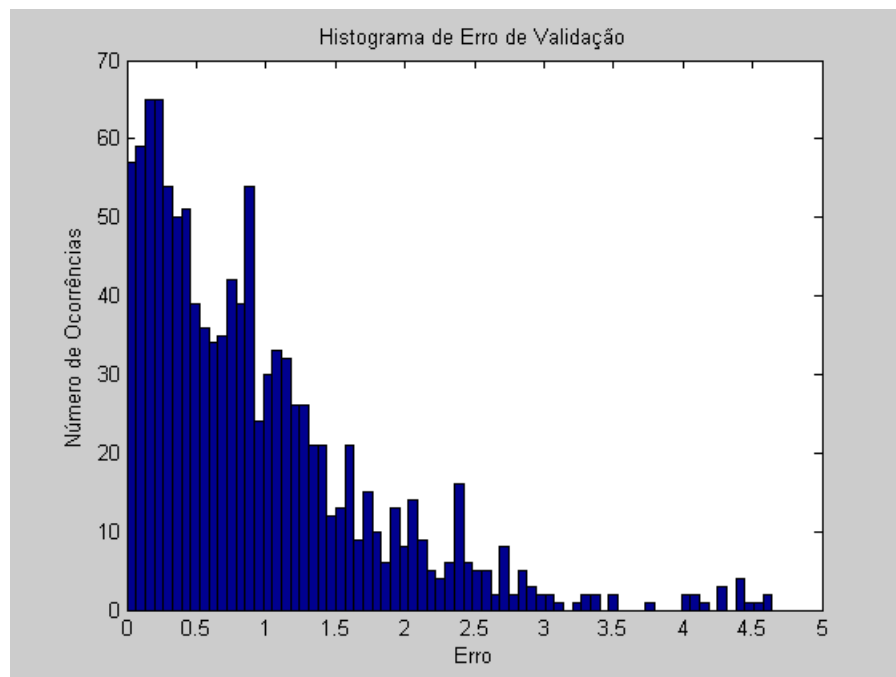


FIGURA 4.16: Validação do modelo – Histograma de erro

Ao final do treinamento é apresentado como resultado 3 (três) matrizes que representam o modelo. As matrizes contêm os seguintes dados:

- Matriz P - matriz $M \times (N+1)$ que representa os modelos lineares;
- Matriz S - matriz $M \times N$ com os desvios padrões para as gaussianas de cada entrada;
- Matriz X_m - matriz $M \times N$ com os valores médios para as gaussianas de cada entrada.

Estas matrizes serão utilizadas para a implementação do modelo obtido “on line”.

Capítulo 5

Apresentação dos Resultados

5.1 Introdução

Para obtenção de resultados em campo foram utilizados os recursos de automação disponíveis na ETA. O supervisório existente permite o acesso à base de dados, através de programas desenvolvidos em linguagem de programação C++. Esta funcionalidade do supervisório permitiu aos programas desenvolvidos para implementação dos modelos, efetuar a leitura e escrita em tags configuradas para as variáveis de entrada e saída dos modelos.

A inclusão das tags nos registros de tendência possibilitou apresentar ao operador gráficos de tendência histórica, onde a comparação entre a saída real e a saída do modelo pode ser feita não apenas ponto a ponto, mas também em tendência.

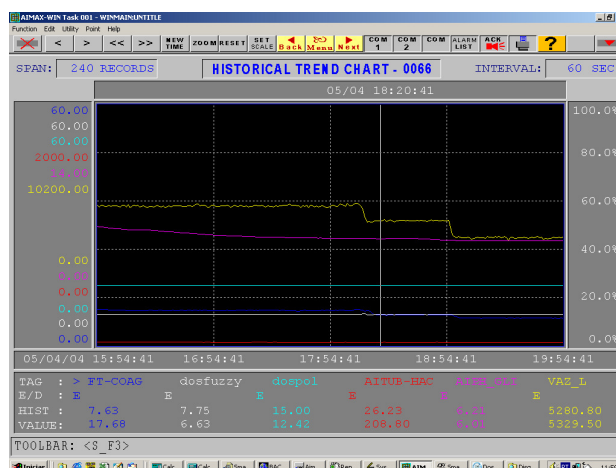


FIGURA 5.1: Registro de Tendência Histórica apresentado para o operador

5.2 Predição da Turbidez da Água Decantada - Resultados de campo

Os testes em campo iniciaram com a implantação do programa para predição da turbidez da água decantada. Este programa lê um arquivo de configuração contendo:

- nome das tags cujos valores serão lidos do supervisório para posteriormente serem utilizados como entrada das redes neurais;
- tempos mortos relativos a cada uma das variáveis de entrada;
- nome da tag onde será escrita a predição no supervisório;
- nome da tag de turbidez da água decantada real (lida do turbidímetro) conforme está configurada no supervisório;
- nome das tags das variáveis de entrada validadas;
- valores mínimos e máximos do range das variáveis de entrada (utilizado na implementação da rede de Yamakawa onde esses valores são usadas para delimitar o domínio das funções de pertinência).

O arquivo de configuração é lido pelo aplicativo quando da sua inicialização. Este arquivo possibilita efetuar a substituição ou alteração dos parâmetros configurados com relativa facilidade, uma vez que pode ser aberto em formato de texto. Como foram implementados vários modelos utilizando-se topologias diferentes de RNAs, utilizou-se um único aplicativo, onde as alterações no modelo corresponderam a alterações no arquivo de configuração e na classe do programa em C++, que implementa a rede neural que contém a dinâmica do modelo em teste.

Foram implementados vários modelos. Em seu trabalho, Souza [43] apresenta detalhadamente os resultados obtidos para os modelos relacionados na tabela 4.2

Com o objetivo de melhorar os resultados em campo, a remodelagem descrita em 4.8 foi implementada, e os resultados obtidos em campo são apresentados na Figura 5.2.

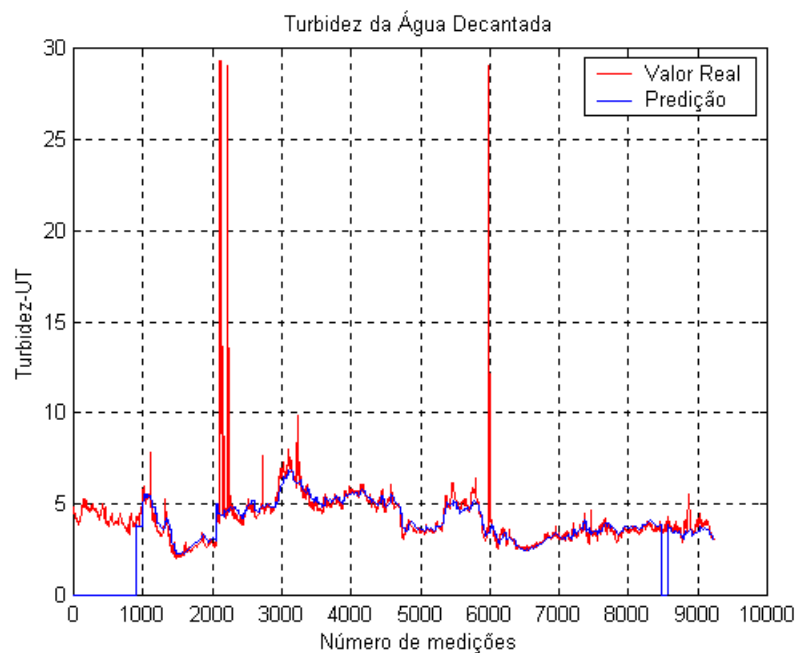


FIGURA 5.2: Resultados de Campo – Período 26 de fevereiro à 3 de março de 2004

A figura 5.2 apresenta os sinais da turbidez real e previsão em bases de tempo diferentes, ou seja, à cada medição é mostrado o valor da turbidez real atual na curva vermelha e, de acordo com a modelagem, a curva azul seria a turbidez para a próxima 1:30 horas.

A figura 5.3 é um zoom da figura 5.2 onde podemos notar que há um atraso da previsão com relação ao valor atual, sendo este resultado contrário ao esperado.

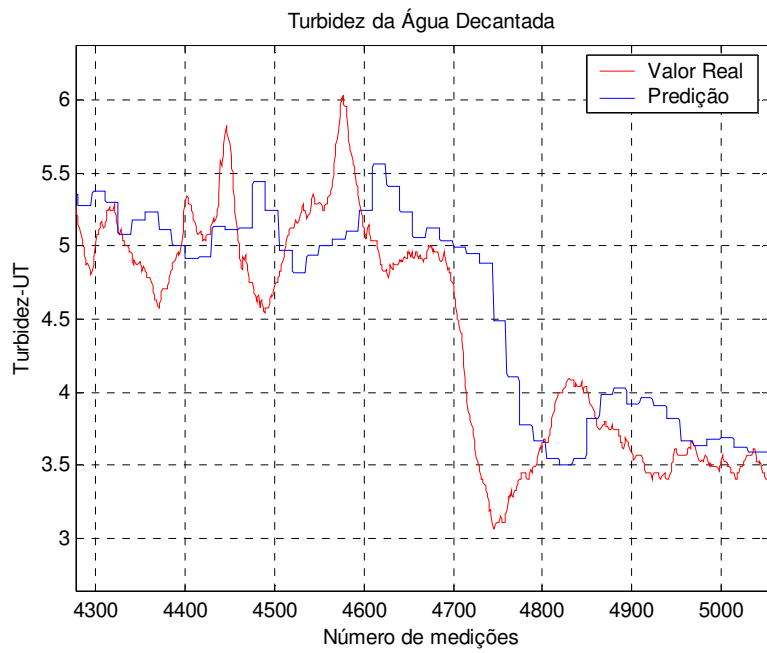


FIGURA 5.3: Resultados de Campo – Período 26 de fevereiro à 3 de março de 2004 - Zoom

Deslocando-se a predição de 14 amostras e em seguida obtendo o gráfico de correlação entre a turbidez real e a predição, na figura 5.4 verifica-se atraso nulo, significando que a predição está atrasada de 14 amostras com relação à turbidez real.

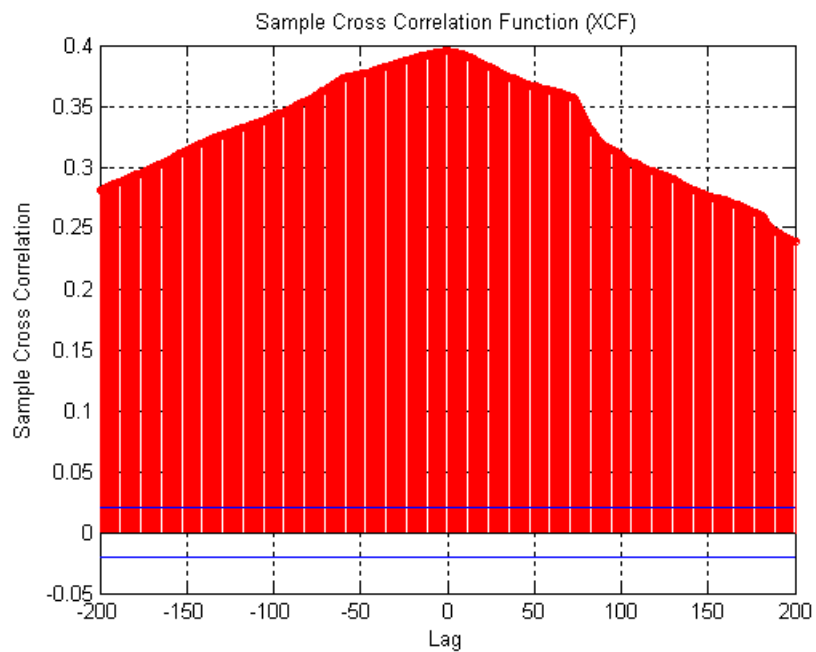


FIGURA 5.4: Correlação entre predição atrasada de 14 amostras e turbidez real

5.3. Identificação do comportamento do operador – Resultados de campo

O programa desenvolvido para implementação do modelo que faz a identificação do comportamento do operador, utiliza recursos já desenvolvidos para o programa da predição da turbidez da água decantada. Foi feita basicamente a alteração da classe que implementa o modelo a ser testado, onde foram utilizadas as seguintes matrizes obtidas do treinamento para o cálculo da saída, ou seja, do valor da dosagem:

Matriz P - matriz $3 \times (4+1)$ que representa os modelos lineares;

Matriz S - matriz 3×4 com os desvios padrões para as gaussianas de cada entrada;

Matriz Xm - matriz 3×4 com os valores médios para as gaussianas de cada entrada.

Este programa lê do arquivo de configuração os seguintes dados:

- tags das variáveis de entrada – turbidez, cor, vazão, pH;
- tags de saída do programa – cor e dosagem gerada pelo modelo;
- modelo Neuro-Fuzzy – médias e desvios padrões das funções de pertinência, além dos modelos lineares usados para defuzzificação, expresso pelas matrizes citadas.

Quando o programa está conectado ao supervisor ele realiza as seguintes funções:

- Lê as variáveis que foram entradas manualmente, que são a cor e tipo de coagulante;
- lê e armazena as variáveis de entrada a cada segundo, sendo que antes de ser armazenada a variável sofre um processo de filtragem;
- calcula a dosagem baseada nos parâmetros atuais e no modelo Neuro-Fuzzy;
- escreve a dosagem calculada e a cor no supervisor;
- Mostra na tela do programa todas as variáveis de processo atuais e faz um comparativo na tela do programa da dosagem do modelo e da dosagem real feita pelo operador;
- Se ocorrer qualquer erro de comunicação com o supervisor o programa informa por

meio de um *log* de erros.

A interface do programa é mostrada na figura 5.3.

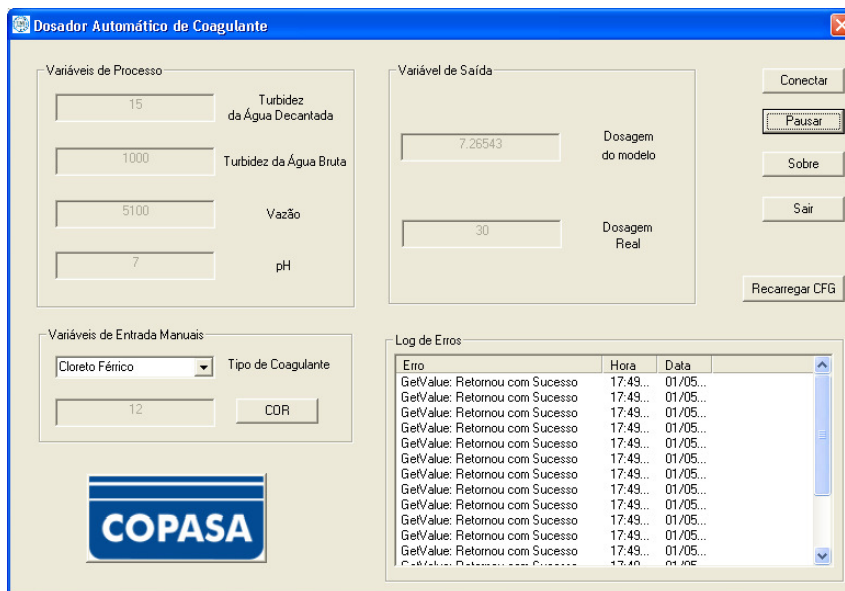


FIGURA 5.5: Programa para determinação da dosagem de coagulante – Interface com o operador

Os resultados obtidos em campo são apresentados nas Figura 5.4 à 5. ?. Os gráficos mostram o registro histórico diário para os valores de dosagem efetivamente praticados pelo operador e aqueles calculados pelo modelo.

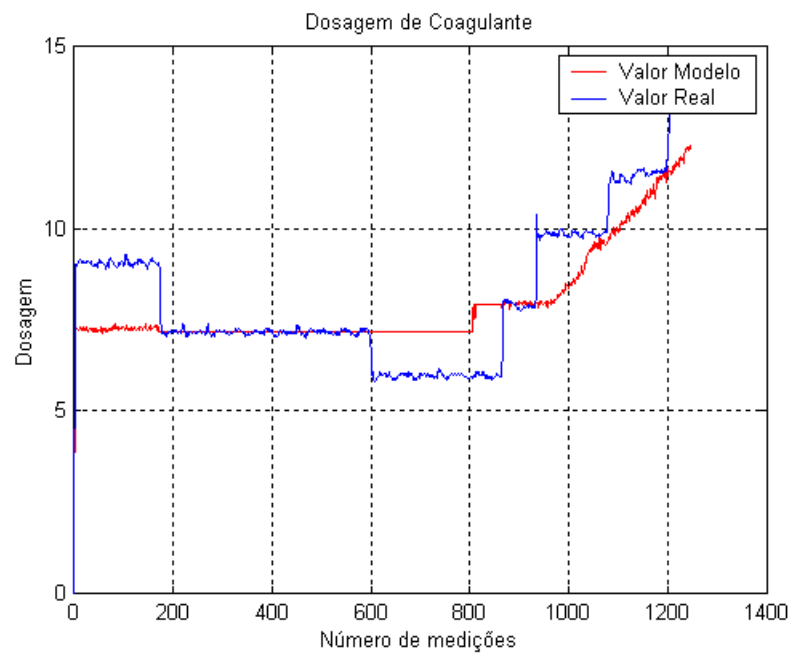


FIGURA 5.6: Identificação do comportamento do operador – Resultados de campo

Capítulo 6

Conclusões

Esta dissertação buscou avaliar a instrumentação analítica e efetuar o controle automático da dosagem de coagulante, no processo de coagulação, em uma ETA. Conforme foi mostrado, a coagulação é um processo multivariável, não linear e que envolve fenômenos físicos e químicos complexos. A ETA alvo do trabalho é uma instalação de grande porte e com características singulares, pois efetua a captação através de barragem submersa, não possuindo um lago.

A avaliação da instrumentação analítica possibilitou o aprendizado de diversos princípios de medição das variáveis e objetivou definir um conjunto de instrumentos que fossem adequados para a instalação em estudo. Notou-se que as características de implementação dos instrumentos devem ser avaliadas com relação à adequação às características da instalação. O sinal de saída, por conter ruídos, deve ser filtrado utilizando-se técnicas de processamento de sinais adequadas. A não observância disso pode comprometer o desempenho ou até mesmo inviabilizar o sistema de controle automático.

Para a definição das variáveis relevantes no processo de coagulação buscou-se, além das publicações na área, desenvolver uma metodologia que permite um estudo mais apurado para identificação destas variáveis assim como as contribuições de seus momentos passados. Nesta metodologia usou-se funções de correlação. Esta ferramenta é extremamente importante para auxiliar na compreensão do processo. Neste trabalho, entretanto, não foi possível tirar proveito de toda a sua potencialidade, pois toda a base de dados foi construída com o sistema em malha fechada. Este fato dificulta sobremaneira a identificação, pois estão embutidos nos

dados a dinâmica da planta e as ações do controlador, neste caso representado pelo operador humano. Uma forma de obter melhores resultados seria segregar a ação do operador da dinâmica da planta, o que não foi possível, considerando que tais ações comprometeriam a qualidade da água tratada.

A modelagem foi feita utilizando-se RNA e RNF para se obter um conjunto de modelos representativos dos pontos de operação e da época do ano, considerando a grande variabilidade das variáveis de entrada.

Foram desenvolvidos modelos para predição da turbidez da água decantada e identificação do comportamento do operador quando controlando a dosagem de coagulante.

Para modelagem da predição da turbidez da água decantada foram testadas várias topologias de rede buscando um modelo com bom desempenho, sobretudo em campo. Em todos os casos o treinamento e a validação foram feitos com dados distintos, sendo que em todos eles foram obtidos altos índices de correlação nas validações dos modelos, mostrando o poder de generalização da rede.

Os primeiros modelos baseados em MLP, não apresentaram resultados satisfatórios em campo, apesar de terem sido implementados com conjuntos de pesos distintos para a época de seca e a estação chuvosa. Este fato e também a grande variabilidade das variáveis de entrada durante a estação chuvosa, sugeriu a utilização de um procedimento de treinamento e modelagem “on line”. Partiu-se então para a implementação da estrutura híbrida neuro-fuzzy, utilizando-se a rede de Yamakawa [43]. As simulações realizadas mostraram a alta capacidade de generalização do neurônio neuro-fuzzy, tendo sido obtido excelente desempenho na validação do modelo e também uma redução significativa no tempo de treinamento quando comparada com a MLP. Entretanto, os resultados de campo não foram satisfatórios, observando-se que variações nas variáveis de entrada tinham um peso pouco significativo na variável de saída. A saída do modelo foi influenciada principalmente pela própria saída atrasada.

A nova tentativa utilizando a MLP, agora com a saída atrasada no tempo de vários períodos de amostragem, apresentou resultado semelhante à rede de Yamakawa, evidenciando um comportamento tendencioso dos modelos.

Estes fatos suscitam a hipótese de falhas na modelagem, decorrentes de razões diversas, como:

podem não ter sido consideradas todas as variáveis de entrada; ??????????

Para trabalhos futuros, a fim de se obter a predição da turbidez da água decantada para a próxima 1:30h, sugere-se a construção de nova base de dados, considerando o sistema em malha aberta e segregando a ação do operador da dinâmica do processo. Para tanto será necessário a construção de um modelo reduzido da ETA (piloto), onde seja possível explorar todas as possibilidades para obtenção de um modelo representativo das condições de operação da ETA.

A modelagem do comportamento do operador, apresentou resultados considerados satisfatórios. Este modelo implementado já tem aplicação prática podendo ser utilizado para substituir a maior parte das intervenções manuais. Entretanto, por se tratar de um modelo em malha aberta, ainda necessita de um sinal de realimentação, neste caso representado pela predição da turbidez da água decantada.

Referências Bibliográficas

- [1] AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas - Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2000.
- [2] ALMEIDA, F. C. *A Structured Approach of Neural Networks in Bankruptcy Prediction*. In: *IVth Brazilian Symposium on Neural Networks*, Goiânia, p. 1-7, 1997.
- [3] BOOTH, S. K., HAGAR, C. B., GARAÑA, E., HALL, H. R. *Blending Supplies for Plant Optimization*. Journal AWWA, Water Utility Operations & Maintenance, Volume 90, Agosto/1998.
- [4] BRAGA, A. P., LUDEMIR, T. B., CARVALHO, A. C. P. L. F. *Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações*. Rio de Janeiro, LTC, 2000.
- [5] BURLINGAME, G. A., PICKEL, M. J., ROMAN, J. T. *Practical Applications of Turbidity Monitoring*. Journal AWWA, Water Utility Operations & Maintenance, Volume 90, Agosto/1998.
- [6] CAMINHAS, W. M., GOMIDE, F. A. C., PEREIRA, G. A. S., TAVARES, H. M. F. *Identificação de Sistemas Dinâmicos: Abordagem Baseada em Neurônio Nebuloso*. In: V Simpósio Brasileiro de Redes Neurais, Belo Horizonte, p. 105-110, 1998.
- [7] CAMINHAS, W. M., LANDIM, R. P., DE MENEZES, B. R., SILVA, S. R. *A Neo-Fuzzy-Neuron with Real Time Training Applied to Flux Observer for an Induction Motor*. In: Vth Brazilian Symposium on Neural Networks, Belo Horizonte, p. 67-72, 1998.
- [8] CAMINHAS, W. M., GOMIDE, F. A. C. *A Fast Learning Algorithm for Neurofuzzy Networks*. Disponível em <http://eletrica.ufsj.edu.br/~nepomuceno/references/fuzzy/cam/gom00.pdf>. Acesso em 20/11/2003.
- [9] CHUN, M. G., KWAK, K. C., RYU, J. W. *Application of ANFIS for Coagulant Dosing Process in Water Purification Plant*. In: IEEE International Fuzzy Systems Conference, Seoul, p. (III-1743) – (III-1748), 1999.
- [10] CLESCERI, L. S., GREENBERG, A. E., EATON, A. D. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 20th Edition, 1998.
- [11] *Controle de Qualidade da Água de Abastecimento*. Disponível em: <http://www.led.ufsc.br/saude/biblioteca/unidade02.pdf>. Acesso em : 09/08/2003.
- [12] COX, C., S., GRAHAM, J. *Steps Towards Automatic Clarification Control*. Londres, IEE, 1994.

- [13] COX, C. S., FLETCHER, I., ADGAR, A. *ANN-based Sensing and Control Developments in Water Industry : A Decade of Innovation*. In : IEEE International Symposium on Intelligent Control, Cidade do México, p. 298-302, 2001.
- [14] DENTEL, S. K., e . KINGERY, K. M. *An Evaluation of Streaming Current Detectors*. American Water Works Association e AWWA Research Foundation. Denver, 1988.
- [15] DI BERNARDO, Luiz. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. Rio de Janeiro, ABES, V.1, 1993.
- [16] ENDRESS+HAUSER. *Industry Measurement Technology - Catalogue*. Alemanha, Volume 2, 2001. Disponível em : <http://www.endress.com/>. Acesso em 08/05/2003
- [17] EVANS, J., ENOCH, C., JOHNSON, M., WILLIAMS, P. *Intelligent based Auto-Coagulation Control applied to Water Treatment Works*. In UKACC International Conference on Control' 98, United Kingdom, Conference Publication N°. 455, IEE, p. 141 – 145, setembro/1998.
- [18] FILHO, E. F. M., CARVALHO, A. C. P. L. F. *Evolutionary Design of MLP Neural Network Architectures*. In: IVth Brazilian Symposium on Neural Networks, Goiânia, p. 58-65, 1997.
- [19] FILHO, A. G. S., DI BERNARDO, L. *Caracterização e Classificação da Água de Lavagem dos Filtros de uma ETA que Utiliza Cloreto Férrico como Coagulante Primário*. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 1999. Anais, Rio de Janeiro, ABES. II-058, p. 1379-1387, 1999.
- [20] FISICA, DEPARTAMENTO DE. *O Movimento Browniano*. Ceará: UFC. Disponível em: www.fisica.ufc.br/brown/brown.htm Acesso em: 20/01/2004.
- [21] FRANCESCHI, M., GIROU, A., CARRO-DIAZ, A. M., MAURETTE, M. T., PUECH-COSTES, E. *Optimization of the Coagulation-Flocculation Process of Raw Water by Optimal Desing Method*. Toulouse, Water Research, p. 3561 – 3572, 2002.
- [22] FREITAS, M. B. *Tratamento de Água para Consumo Humano. Especialização em Engenharia Sanitária e Controle Ambiental*. Rio de Janeiro: FIOCRUZ/ENSP, 2001.
- [23] GOMM, J. B., DOBERTY, S. K., WILLIAMS, D. *Control of pH In-Line Using a Neural Predictive Strategy*. In: IEE International Conference on Control, Liverpool, UK, p. 2-5, 1996.
- [24] GORGA, F. R., *Van der Walls Interaction*. Disponível em http://webhost.bridgew.edu/fgorga/proteins/van_der_walls.htm. Acesso em 11/05/2004.
- [25] HACH COMPANY. *Catálogo de Produtos*. U.S.A.1998. Disponível em <http://www.hach.com/>. Acesso em 08/05/2003.

- [26] HAN, Tae-Hwan., NAHM, Eui-Suck., WOO, Kwang-Bang., KIM, C. J., Ryu, Jeong-Woong. *Optimization of Coagulant Dosing Process in Water Purification System*. In: SICE, Tokushima, p. 1105-1109, 1997.
- [27] HART, V. S., JOHNSON, C. E., LETTERMAN, R. D. *An Analysis of Low-Level Turbidity Measurements*. Journal AWWA, Management & Operations, Dezembro/1992.
- [28] HAYKIN, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. New Jersey, Prentice Hall, 1994.
- [29] HOBECO SUDAMERICANA LTDA. Sensores de Qualidade de Água para Processos e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro. Disponível em : <http://www.hobeco.net>. Acesso em : 08/05/2003.
- [30] ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – INTERNATIONAL STANDARD – ISO 7027:1999(E) – *Water quality – Determination of turbidity* Suíça, 1999.
- [31] JANG, J. S., SUN, C. T., MIZUTANI, E. *Neuro Fuzzy and Soft Computing*. New Jersey, Printece Hall, 1997.
- [32] MEDEIROS, A. V., SOUZA, F. E. C., MAITELLI, A. L. *Implementação de um Sistema de Extração de Conhecimento de Redes Neurofuzzy*. Natal: UFRN. Disponível em: www.ufmnet.br/~vinicius/II_WTCD_Anderson.doc. Acesso em: 20/11/2003.
- [33] NAHM, E. S., LEE, S. B., WOO, K. B., LEE, B. K., SHIN, S. K. *Development of an Optimum Control Software Package for Coagulant Dosing Process in Water Purification System*. In SICE' 96, Tottori, p. 1157 – 1161, julho/1996.
- [34] NORTON, R., AUCKLY, C., RAYMOND, W., BENEDICT, S., GOODWILL, J. *Pilot-Plant Training for High Turbidity*. Journal AWWA, Operator Training, Volume 90, Outubro/1998.
- [35] OLIVEIRA, W. E. **et al.** *Técnica Abastecimento e Tratamento de Água*. São Paulo, CETESB, V. 1, 1976.
- [36] PEDRYCZ, W. *Computational Intelligence : An Introduction*. University of Manitoba, Winnipeg, 1998.
- [37] PEREIRA, M. V. L. *Modelagem e implementação de um Sistema para Predição da Turbidez da Água Decantada em uma Estação de Tratamento de Água*. Monografia (Graduação em engenharia de Controle e Automação). Belo Horizonte : UFMG, 2003.
- [38] RODRIGUES, S. A., ALVES, M. R. *Dispersões Coloidais. O Movimento Browniano*. Ceará: UFC. Disponível em: www.fisica.ufc.br/brown/brown.htm Acesso em: 20/01/2004.

- [39] RUMELHART, D. E., HINTON, G. E., WILLIAMS, R. J. *Learning Internal Representations by Error Propagation*. In : *Parallel Distributed Processing : Explorations in the Microstructure of Cognition*, Cambridge, MIT Press, V. 1, 1986.
- [40] SCHAFFAZICK, S.R., PHOLMANN, A. R., FREITAS, L. L., GUTERRES, S. S. Caracterização e Estudo de Estabilidade de Suspensões de Nanocápsulas e de Nanoesferas Poliméricas contendo Diclofenato. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2002. Disponível em http://www.colfarma.org.ar/afb/revistas/trabajos/21_2/04_stanis%E7uaski.pdf. Acesso em 11/05/2004.
- [41] SHAW, I. A., SIMÕES M. G. *Controle e modelagem fuzzy*. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1999.
- [42] SILVA, T. S. S., *Estudo de Tratabilidade Físico-Química com o uso de Taninos Vegetais em Água de Abastecimento e Esgoto*. [Mestrado] Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 1999.
- [43] SOUZA, C. M. P. *Predição da Turbidez da Água Decantada em uma Estação de Tratamento de Água*. [Monografia] UFMG, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2004.
- [44] SU, M.C., TEW, C. Y. *A Self-Organizing Feature-Map-Based Fuzzy System*. Taiwan, IEEE, 2000.
- [45] TEODORESCU, H-N. L., CHELARU, M., KANDEL, A., TOFAN, I., IRIMIA, M. *Fuzzy Methods in Tremor Assessment, Prediction and Rehabilitation*. In: *Artificial Intelligence in Medicine*, p.1-24. Disponível em: http://www.etc.tuiasi.ro/Lab_EMSI/article_tremor_AI_Med.pdf. Acesso em: 20/11/2003.
- [46] VALENTIN, N., DENOEU, T. e FOTOOHI, F. *An Hybrid Neural Network based system for optimization of coagulant dosing in a water treatment plant..* IEEE, p. 3380-3385, 1999.
- [47] VALENTIN, N., DENOEU, T. *A Neural Network-Based Software Sensor for Coagulation Control in a Water Treatment Plant*. IOS Press. In *Intelligent Data Analysis 5*, p. 23-29, 2001.
- [48] VOZNAYA, N. F. *Chemistry of Water and Microbiology*. URSS, 1981.
- [49] YAMAKAWA, T., UCHINO, E., MIKI, T., KUSANAGI, T. *A Neo-Fuzzy Neuron and its Applications to System Identification and Predictions to System Behavior*. In: 2nd IIZUKA, Iizuka, p. 477-483, 1992.

Sistema de Inferência Nebuloso Neuroadaptativo - ANFIS

Um sistema de inferência nebuloso neuroadaptativo ANFIS – *Adaptive Neural Fuzzy Inference System*) é um sistema de inferência nebuloso (FIS – *Fuzzy Inference System*) que pode ser treinado com um algoritmo backpropagation para modelar um conjunto de dados entrada/saída. O FIS, permitindo adaptação, contempla o sistema nebuloso com a habilidade de aprender inter-relações embutidas nas entradas e saídas dos dados utilizados.

O modelo de ANFIS utilizado neste trabalho é do tipo Tagaki-Sugeno (conhecido como *TSK fuzzy model*), proposto por Tagaki & Sugeno (1985) e Sugeno & Kang (1988). Considerando uma entrada e uma saída, ele consiste de regras de produção – *SE* <condição> *ENTÃO* <ação> - que podem ser representadas na forma geral:

Se x é A_1 então $y_1 = p_1x + q_1$

Se x é A_2 então $y_2 = p_2x + q_2$

...

Se x é A_j então $y_j = p_jx + q_j$

...

Se x é A_m então $y_m = p_mx + q_m$

$$y = \frac{\sum_{j=1}^m w_j y_j}{\sum_{j=1}^m w_j} = \frac{a}{b}$$

$$w_j = \mu_{A_j}(x) = \exp\left[\frac{-1}{2} \left(\frac{x - \bar{x}_j}{\delta_j}\right)^2\right]$$

O treinamento da rede utiliza o método dos mínimos quadrados para realizar o ajuste dos parâmetros lineares (p_j e q_j) e o método do gradiente para otimizar os parâmetros não-lineares das gaussianas (\bar{x}_j e δ_j). Esse treinamento híbrido reduz o tempo de treinamento, quando comparado com a rede ANFIS que utiliza somente o método do gradiente para ajustar todos os parâmetros.

figura 2.6 mostra a topologia da rede ANFIS com n entradas e uma saída.

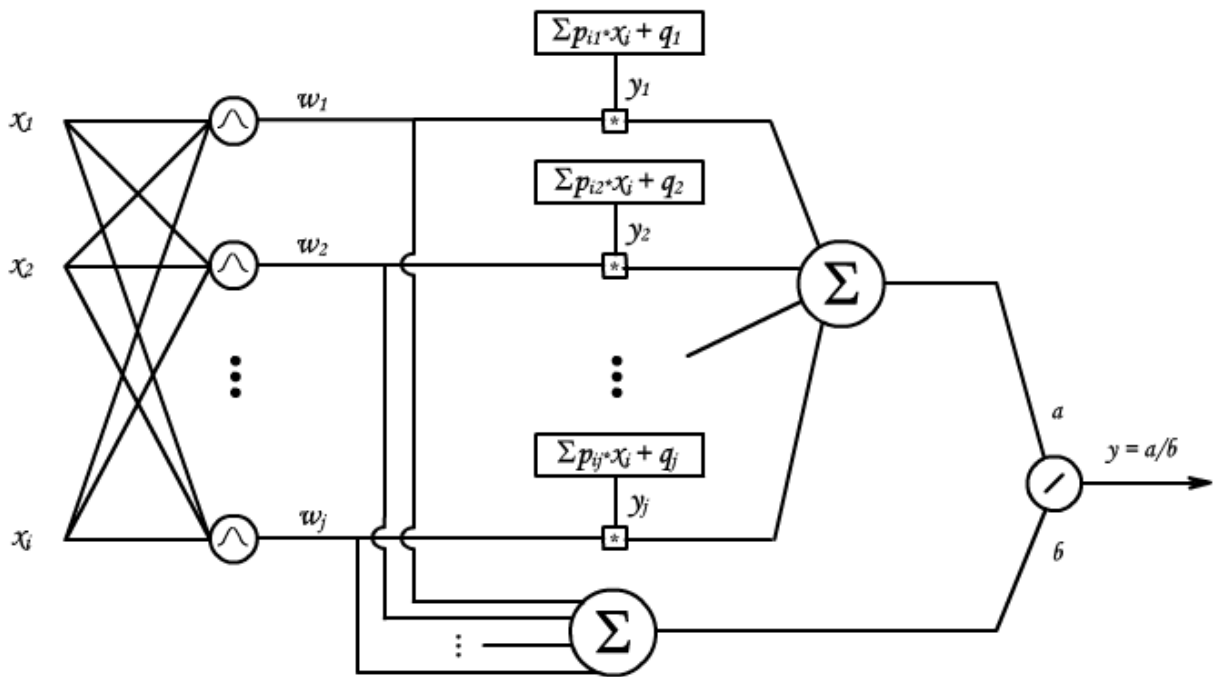


FIGURA 6.7: Topologia da Rede ANFIS