



DIMITRI CAMPOS VIANA

**INSTRUMENTAÇÃO ÓPTICA APLICADA À
ANÁLISE DE QUALIDADE E TRATAMENTO DE
ÁGUA E ESGOTO:
SOLUÇÕES DE BAIXO CUSTO PARA ESTAÇÕES
DE PEQUENO PORTE**

LAVRAS – MG

2017

DIMITRI CAMPOS VIANA

**INSTRUMENTAÇÃO ÓPTICA APLICADA À ANÁLISE DE QUALIDADE
E TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO:
SOLUÇÕES DE BAIXO CUSTO PARA ESTAÇÕES DE PEQUENO PORTE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, para a obtenção
do título de Doutor.

Prof. Dr. Roberto Alves Braga Jr.

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira

Coorientador

LAVRAS – MG

2017

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da
Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo próprio autor.**

Viana, Dimitri Campos.

Instrumentação Óptica Aplicada à Análise de Qualidade e
Tratamento de Água e Esgoto : Soluções de Baixo Custo para
Estações de Pequeno Porte / Dimitri Campos Viana. - 2017.

200 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Alves Braga Jr..

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Tratamento de Água 2. Processamento de Imagens 3.
Dosagem Automática. I. Braga, Roberto Alves. II. de Oliveira, Luiz
Fernando Coutinho. III. Título.

DIMITRI CAMPOS VIANA

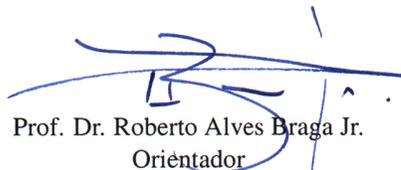
**INSTRUMENTAÇÃO ÓPTICA APLICADA À ANÁLISE DE QUALIDADE
E TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO: SOLUÇÕES DE BAIXO CUSTO
PARA ESTAÇÕES DE PEQUENO PORTE**

**OPTICAL INSTRUMENTATION APPLIED TO DRINKING WATER AND
WASTEWATER QUALITY ANALYSIS AND TREATMENT: LOW COST
SOLUTIONS FOR COMPACT STATIONS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, para a obtenção
do título de Doutor.

APROVADA em 30 de Maio de 2017.

Dra. Cristina Ferreira Silva e Batista UFLA
Dr. Danton Diego Ferreira UFLA
Dr. Luciano dos Santos Rodrigues UFMG



Prof. Dr. Roberto Alves Braga Jr.
Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira
Co-Orientador

**LAVRAS – MG
2017**

*Aos meus pais, Denise e João,
pelos esforços dedicados à construção
da base que, entre outras coisas,
me permitiu concluir este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Roberto Braga, pela orientação, por sua constante dedicação à profissão e também pelo companheirismo, apoio financeiro e empréstimo de equipamentos. Aos colaboradores do CEDIA, pela criação e manutenção de um ótimo ambiente de trabalho. Ao prof. Luiz Fernando Coutinho e aos membros da banca, pelas diversas contribuições que fizeram a este texto.
- À Alessandra, pelo carinho, companheirismo e por suprir o tempo que este trabalho retirou da minha convivência com o Nicolás, que hoje é o meu maior motivador. Aos demais membros da família, pelos incentivos diretos e indiretos, em especial ao Carlos Márcio, pelas excursões ao centro de Belo Horizonte que ajudaram a montar “a máquina”.
- Aos que contribuíram e aos que contribuem para que a Universidade Federal de Lavras seja esta grande instituição de ensino, pesquisa e extensão. Em especial à Prof^a. Josefina A. de Souza e ao Prof. José Luís Contado, pelo empréstimo de equipamentos, e aos operadores da ETA e da ETE, pelo apoio e fornecimento de materiais. Aos professores e técnicos administrativos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos e esforços dedicados.
- Aos membros do Núcleo Eletricidade e Automação (NEA). Aos professores, por assumirem parte de minha carga de docência ao longo dos semestres que conduzi este trabalho. Aos técnicos laboratoristas, em especial Bruno Vicentini e Fabiano Ferreira, pelas várias contribuições na montagem dos aparatos experimentais.

- Aos parceiros de trabalho e aos colegas de pós-graduação, em especial à Josiane Ferreira Pires, Rolando González-Peña e Carlos José dos Reis, pelas contribuições e crescimento que me proporcionaram. Aos alunos do curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação que participaram de alguma etapa ou contribuíram de alguma forma para este trabalho, em especial Robson Lima, Pedro Pinheiro e Artur Baccarin.
- A Deus, por permitir meu convívio com todas essas pessoas especiais e por todos os amparos dos quais tenho ciência e por aqueles que nem desconfio.

*“Wake up sleepy head
I think the sun’s a little brighter today
Smile and watch the icicles melt away
and see the waters rising...”*

(Carter Beauford & Dave Matthews)

RESUMO

Neste trabalho, propõe-se o uso de técnicas de processamento de imagens para a monitoração de atributos frequentemente analisados em processos de tratamento de água e esgoto, de forma que os instrumentos de medição almejados possam fornecer informações para sistemas automáticos de dosagem de produtos químicos sem onerá-los significativamente. Com isso, espera-se estimular o uso de sistemas de automação em estações de tratamento, em especial nas de pequeno porte, para as quais a redução dos custos relacionados a estes sistemas e à mão-de-obra operacional é mais impactante, podendo ser um fator decisivo para implantações em comunidades isoladas, fazendas, processos industriais, universidades e outras localidades. Em um primeiro momento, um sistema de dosagem automática de produto coagulante foi desenvolvido em três etapas: na primeira, foi proposta uma técnica para medição de turbidez a partir de imagens capturadas por uma *webcam* comum, sendo que os resultados obtidos atestaram sua confiabilidade. Na segunda etapa, um novo algoritmo para a implementação de sistemas *fuzzy* em controladores digitais de pequeno porte foi proposto, contribuindo para que este tipo de *hardware* possa ser utilizado nos sistemas de automação em questão. Integrando as duas primeiras etapas, um protótipo do turbidímetro baseado em processamento de imagens e uma planta piloto foram construídos, demonstrando a coerência do sistema de dosagem implementado e a sua aptidão para ser instalado em estações de tratamento de água reais. Em um segundo momento, uma sequência de trabalho similar à anterior foi iniciada com o desenvolvimento de um método para monitorar a desinfecção de águas residuais submetidas a processos de cloração. A partir de avaliações da atividade biológica detectada em amostras coletadas em uma estação de tratamento de efluentes, a técnica proposta foi capaz de determinar se as desinfecções ocorreram de forma satisfatória ou não, permitindo a criação de um instrumento de baixo custo que forneça informações para realimentar sistemas de dosagem automática de produtos derivados do cloro.

Palavras-chave: Tratamento de Água. Tratamento de Esgoto. Processamento de Imagens. Turbidez. Desinfecção. Dosagem Automática.

ABSTRACT

In this work, the use of image processing techniques for monitoring important attributes in drinking water and wastewater treatment processes is proposed, so that the glimpsed measuring instruments can provide information for automatic dosing systems of chemical products without overpricing them. The purpose is to stimulate the use of automation systems in treatment plants, especially in compact ones, for which the reduction of costs with these systems and with the operational workforce is more impacting and, in some cases, can be a decisive factor for deployments in isolated communities, farms, small industries, universities and other localities. At first, an automatic dosing system for coagulant product was developed in three steps: in the first one, a technique to measure water turbidity from images captured by a common webcam was proposed, and reliable results were obtained. In the second step, a new algorithm for the implementation of fuzzy systems in compact digital controllers was proposed, contributing for the use of this kind of hardware in the desired automation systems. Integrating the previous steps, a prototype of the image processing based turbidity meter and a pilot plant were builded, demonstrating the coherence of the implemented dosing system and its suitability to be installed on a real drinking water treatment plant. In another effort, a work sequence similar to the previous one was initiated with the development of a method to monitor the disinfection of wastewaters subjected to chlorination processes. Based on evaluations of the biological activity detected in samples collected at a wastewater treatment plant, the proposed technique was able to establish if the disinfections were accomplished or not, allowing the creation of a low cost instrument to feedback automatic chlorine dosing systems.

Keywords: Drinking Water Treatment. Wastewater Treatment. Image Processing. Turbidity. Disinfection. Automatic Dosing System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma típico da tecnologia de tratamento de ciclo completo, também conhecido como tratamento convencional, empregado na maioria das ETAs do Brasil.	40
Figura 1.2 – Fluxograma dos elementos típicos da etapa de tratamento preliminar de uma Estação de Tratamento de Esgoto.	45
Figura 1.3 – Fluxograma típico de um sistema de atuação automática.	49
Figura 1.4 – Controlador Lógico–Programável composto por uma fonte de alimentação, uma Unidade Central de Processamento (CPU), dois módulos para conexões de sinais elétricos de entrada e três módulos para conexões de sinais elétricos saída.	52
Figura 1.5 – Tela sinóptica na qual são representados alguns elementos da etapa de tratamento preliminar e da elevatória interna da ETE instalada no <i>campus</i> da Universidade Federal de Lavras.	56
Figura 1.6 – Janela de controle da elevatória interna da ETE em questão, por meio da qual é possível visualizar e selecionar seu modo de operação, ligar e desligar manualmente a bomba selecionada, alterar sua velocidade, entre outras operações.	57
Figura 1.7 – Estação de tratamento de água Benedito Tibúrcio Barbosa, localizada no <i>campus</i> da Universidade Federal de Lavras, com capacidade para tratar aproximadamente 540 L min^{-1}	60
Figura 1.8 – Conjunto de grãos luminosos, descrito em português como “padrão de <i>speckle</i> ”.	62
Figura 1.9 – Diagrama esquemático de uma possível configuração experimental.	64

Figura 1.10 – Diagrama que resume as principais técnicas de processamento de imagem relacionadas ao <i>speckle</i> dinâmico, no qual os retângulos representam a câmera e os arquivos digitais produzidos pelas funções computacionais representadas pelas setas.	65
Figura 1.11 – Variações de intensidade de um determinado <i>pixel</i> registradas em uma matriz THSP construída a partir de uma coleção com 512 imagens.	67
Figura 2.1 – Modelo experimental composto por um emissor laser (<i>HeNe</i>), cubeta de vidro (15 mL), película semitransparente, <i>webcam</i> (modelo Labtec 1200) e anteparo (placa de poliestireno de baixa rugosidade).	87
Figura 2.2 – Representação cartesiana da correspondência entre os dois conjuntos de dados obtidos a partir da análise das 48 amostras envolvidas no experimento: valores de intensidade luminosa no eixo das abscissas e valores fornecidos pelo turbidímetro tradicional no eixo das ordenadas.	93
Figura 2.3 – Comparação gráfica dos resultados obtidos por meio do método proposto com os resultados fornecidos pelo turbidímetro tradicional, para as nove amostras produzidas para validar a equação utilizada para expressar valores de intensidade luminosa em NTU.	95
Figura 3.1 – Fluxograma das principais etapas de processamento de um sistema de inferência <i>fuzzy</i> com n entradas e uma saída. . . .	107
Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo tradicional para o laço de conversão <i>fuzzy</i> /escalar por meio do método do centro de massa.	108
Figura 3.3 – Fluxograma do algoritmo proposto para o laço de conversão <i>fuzzy</i> /escalar por meio do método do centro de massa.	110

Figura 3.4 – Exemplo de funcionamento do controlador durante 60 minutos, no qual podem ser observados: o nível real (linha com círculos inseridos), o <i>setpoint</i> (linha tracejada) e o sinal de controle (linha sólida). Os dois primeiros na escala de 0 a 400 mm e o último na escala de 0 a 80 %	116
Figura 4.1 – Principais componentes da planta piloto: reservatórios, bombas elétricas, válvulas solenóides, medidores de vazão e turbidez, chaves de detecção de nível e conexões hidráulicas. .	127
Figura 4.2 – Principais elementos do sistema de automação da planta piloto e suas interações: CLP, comunicando-se via protocolo <i>ethernet</i> com o PC, que por sua vez se comunica via interface USB com a câmera embutida no medidor de turbidez.	129
Figura 4.3 – Diagrama esquemático do medidor de turbidez desenvolvido: emissor laser, cubeta com chaves de nível alto e nível baixo (para permitir amostragens automáticas), câmera USB e anteparo; montagem em câmara escura de dimensões 33cm × 24cm × 10cm (comprimento × altura × profundidade).	132
Figura 4.4 – Representação cartesiana da correspondência entre valores de intensidade luminosa e valores de turbidez. Os pontos apresentam os resultados das análises das cinco amostras de calibração. A linha representa os valores de turbidez fornecidos pelo polinômio de conversão em função dos valores de intensidade luminosa contidos no intervalo de interesse.	138
Figura 4.5 – Vazões produzidas pelas bombas de água clara (linha tracejada) e água escura (linha pontilhada) ao longo dos 45 minutos do ensaio referente à primeira repetição do experimento realizado.	139

Figura 4.6 – Valores de Turbidez obtidos por meio do turbidímetro tradicional (quadrados interpolados por linha tracejada) e os fornecidos pelo turbidímetro proposto (círculos interpolados por linha pontilhada). As marcações representam os valores obtidos nos instantes de amostragem e as linhas apenas fornecem uma estimativa de comportamento em momentos intermediários. 141

Figura 4.7 – Sinais relacionados ao controlador *fuzzy*: 1) fluxo de água na entrada do sistema de tratamento, obtido por meio da soma das vazões das bombas de captação e aplicado à primeira entrada do controlador; 2) turbidez da água na entrada do sistema de tratamento, fornecido pelo medidor proposto e aplicado à segunda entrada do controlador; 3) vazão de produto coagulante, coletada na saída do controlador e transferida para a bomba dosadora. 142

Figura 5.1 – Arranjo experimental composto por um emissor laser (*HeNe*), uma placa de vidro despolido (com concavidade central de 10 μ L) e estereoscópio com câmera digital (modelo Marlin F033C) acoplada. 159

Figura 5.2 – Atividades detectadas nas amostras durante vinte minutos: média obtida com 16 repetições de cada categoria (A1 – água secundária sem adição de produto desinfetante; A2 – água secundária com 2 % de produto desinfetante; A3 – água secundária com 10 % de produto desinfetante; A4 – água secundária com 20 % de produto desinfetante; A5 – água mineral). 163

Figura 5.3 – Dispersão das atividades detectadas nas 16 amostras de cada categoria no décimo quarto minuto após suas respectivas preparações. Em cada caixa, a marca central é a mediana e as bordas são o 25º e 75º percentis. Os <i>whiskers</i> estendem-se até os valores mais extremos que não são considerados atípicos (<i>outliers</i>), os quais são marcados individualmente com o símbolo “+”	165
Figura 6.1 – Janela virtual que fornece uma interface gráfica para geração de uma ou mais matrizes THSP a partir de uma ou mais coleções de imagens.	182
Figura A.1 – Conexões elétricas do CLP da planta piloto: medidores de vazão, botão de emergência e chaves de nível conectadas às suas entradas digitais; bombas motorizadas, válvulas solenóides e bomba eletromagnética (dosadora) conectadas às suas saídas digitais.	191

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Intensidades luminosas (tonalidades de cinza entre 0 e 255) obtidas a partir das avaliações em triplicata das 48 amostras do primeiro experimento.	91
Tabela 2.2 – Análise de variância para a intensidade luminosa atribuída às amostras por meio do processamento de imagens.	91
Tabela 2.3 – Comparação de médias para as intensidades luminosas obtidas com técnica proposta ao se analisar as seis amostras de cada tratamento.	92
Tabela 2.4 – Valores de turbidez [NTU] fornecidos pelo turbidímetro tradicional a partir das avaliações em triplicata das 48 amostras do primeiro experimento.	93
Tabela 2.5 – Resultados das avaliações das nove amostras de validação produzidas para o segundo experimento: por processamento de imagens (tonalidades de cinza entre 0 e 255) e por meio do turbidímetro tradicional [NTU], sempre em triplicata.	95
Tabela 3.1 – Disponibilidade de <i>toolboxes</i> para implementação de lógica <i>fuzzy</i> em CLPs de dois fabricantes expressivos, de acordo com as famílias e os portes de seus produtos.	105
Tabela 3.2 – Variáveis de entrada e saída do controlador e os conjuntos <i>fuzzy</i> que cobrem seus respectivos universos de discurso. Para as funções de pertinência triangulares, as colunas <i>a</i> , <i>b</i> e <i>c</i> contêm os valores que formam os vértices $(a,0)$, $(b,1)$ e $(c,0)$. Para os casos em que a coluna <i>d</i> é utilizada, os valores definem conjuntos trapezoidais de vértices $(a,0)$, $(b,1)$, $(c,1)$ e $(d,0)$	114

Tabela 3.3 – Comparação dos resultados fornecidos pelas duas implementações do mesmo controlador <i>fuzzy</i> : no CLP, por meio da técnica proposta, e no PC, por meio da ferramenta “Fuzzy Logic Toolbox” (MathWorks).	115
Tabela 4.1 – Variáveis de entrada e saída do controlador e os conjuntos <i>fuzzy</i> que cobrem seus respectivos universos de discurso. Para as funções de pertinência triangulares, as colunas <i>a</i> , <i>b</i> e <i>c</i> contêm os valores que formam os vértices $(a,0)$, $(b,1)$ e $(c,0)$. Para os casos em que a coluna <i>d</i> é utilizada, os valores definem conjuntos trapezoidais de vértices $(a,0)$, $(b,1)$, $(c,1)$ e $(d,0)$	135
Tabela 5.1 – Análise de variância para a atividade detectada nas amostras no décimo quarto minuto após suas respectivas preparações. .	164
Tabela 5.2 – Comparação de médias para as atividades detectadas pelo <i>biospeckle</i> (valores produzidos pelo algoritmo AVD) nas 16 amostras de cada categoria no décimo quarto minuto após suas respectivas preparações.	165
Tabela 5.3 – Número Mais Provável (NMP) de coliformes por 100 mL de água secundária sem adição de produto desinfetante (categoria A1), para séries de 3 tubos com diluições de 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3} , de acordo com os testes presuntivos.	167
Tabela 5.4 – Número Mais Provável (NMP) de coliformes por 100 mL de água secundária sem adição de produto desinfetante (categoria A1), para séries de 3 tubos com diluições de 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3} , de acordo com o teste para coliformes totais (VBBL).	167

Tabela 5.5 – Número Mais Provável (NMP) de coliformes por 100 mL de água secundária sem adição de produto desinfetante (categoria A1), para séries de 3 tubos com diluições de 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3} , de acordo com o teste para coliformes termotolerantes (EC). 168

Tabela A.1 – Valores de fluxo (mL min^{-1}) usados na estrutura de parâmetros da sub-rotina que faz o sequenciamento de vazões das bombas de captação, quando estas estão operando em modo automático.196

LISTA DE SIGLAS

- AVD** Valor Médio das Diferenças (do inglês *Average Value of Differences*)
- BSL** Biospeckle Laser
- CCD** Dispositivo de Carga Acoplada (do inglês *Charge-Coupled Device*)
- CEPT** Tratamento Primário Quimicamente Assistido (do inglês *Chemically Enhanced Primary Treatment*)
- CLP** Controlador Lógico–Programável
- CPU** Unidade Central de Processamento (do inglês *Central Processing Unit*)
- DBC** Delineamento de Blocos Casualizados
- DBO** Demanda Biológica de Oxigênio
- DQO** Demanda Química de Oxigênio
- ETA** Estação de Tratamento de Água
- ETE** Estação de Tratamento de Esgoto
- LASER** Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação (do inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)
- MCO** Matriz de Co-Ocorrência
- MI** Momento de Inércia
- NTU** Unidade Nefelométrica de Turbidez (do inglês *Nephelometric Turbidity Unit*)
- OD** Oxigênio Dissolvido
- OPC** Plataforma Aberta de Comunicações (do inglês *Open Platform Communications*)

ORP Potencial de Oxirredução (do inglês *Oxidation-Reduction Potential*)

PC Computador Pessoal (do inglês *Personal Computer*)

PWM Modulação por Largura de Pulso (do inglês *Pulse Width Modulation*)

THSP Histórico Temporal do Padrão de Speckle (do inglês *Time History of the Speckle Pattern*)

UASB Fluxo Ascendente de Manta de Lodo (do inglês *Upflow Ascendent Sludge Blanket*)

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 – CONTEXTUALIZAÇÃO	33
1	INTRODUÇÃO	33
1.1	Problemas Estudados	33
1.2	Objetivos	35
1.3	Estrutura da Tese	36
2	FUNDAMENTOS	38
2.1	Tratamento de Água	38
2.2	Tratamento de Esgoto	43
2.3	Automação de Estações de Tratamento	48
2.4	Estações de Tratamento Compactas	58
2.5	Speckle Laser Dinâmico	62
	REFERÊNCIAS	80
	CAPÍTULO 2 – DESENVOLVIMENTO DE UM TURBIDÍMETRO DE BAIXO CUSTO POR MEIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS	83
1	INTRODUÇÃO	83
2	MATERIAL E MÉTODOS	87
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
4	CONCLUSÃO	98
	REFERÊNCIAS	100
	CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES FUZZY EM CLPs DE PEQUENO PORTE	103
1	INTRODUÇÃO	103
2	METODOLOGIA	107
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	113

4	CONCLUSÃO	118
	REFERÊNCIAS	120
	CAPÍTULO 4 – DOSAGEM AUTOMÁTICA DE PRODUTO COAGULANTE A PARTIR DE MEDIÇÕES DE TURBIDEZ BASEADAS EM PROCESSAMENTO DE IMAGENS	123
1	INTRODUÇÃO	123
2	MATERIAL E MÉTODOS	127
2.1	Instrumentação e Material Hidráulico	127
2.2	Automação e Resumo do Funcionamento	129
2.3	Medição de Turbidez por Processamento de Imagens	131
2.4	Controlador Fuzzy para Dosagem de Produto Coagulante	134
2.5	Amostras e Procedimento Experimental	136
2.6	Acompanhamento das Medições de Turbidez	137
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	138
3.1	Desempenho do Medidor de Turbidez	138
3.2	Desempenho do Controlador Fuzzy	142
3.3	Desempenho Geral do Sistema	145
4	CONCLUSÃO	147
	REFERÊNCIAS	150
	CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO DO BIOSPECKLE PARA MONITORAÇÃO DA DESINFECÇÃO DE ÁGUAS RESIDUAIS SUBMETIDAS A CLORAÇÃO	153
1	INTRODUÇÃO	153
2	MATERIAL E MÉTODOS	158
2.1	Amostras	158
2.2	Aparato experimental	158
2.3	Aquisição e processamento de imagens	160
2.4	Análises estatísticas	161

2.5	Validação por comparação com padrões estabelecidos	162
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	163
4	CONCLUSÃO	170
	REFERÊNCIAS	176
	CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	179
1	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	179
2	PERSPECTIVAS	181
	REFERÊNCIAS	187
	APÊNDICE A – PROJETOS DA PLANTA PILOTO	191
1	PROJETO ELÉTRICO	191
2	PROGRAMAS UTILIZADOS E DESENVOLVIDOS	194

CAPÍTULO 1 – CONTEXTUALIZAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problemas Estudados

Entende-se por água potável aquela que pode ser consumida sem causar danos à saúde, ou seja, para ser considerada potável, a água deve estar livre de substâncias químicas nocivas e de microrganismos patogênicos. Além disso, é desejável que a água potável seja isenta de substâncias que lhe adicionem cor, odor ou sabor, ainda que essas substâncias sejam inofensivas a quem as consome. A relação entre a qualidade da água e inúmeras enfermidades é amplamente conhecida, sendo a contaminação das águas utilizadas para consumo humano um dos principais riscos à saúde pública.

Atualmente, devido ao crescimento da população mundial e conseqüente acentuação das atividades industriais e agrícolas, o aumento da degradação das águas superficiais e subterrâneas em diversas regiões do planeta é uma realidade. Dessa forma, os processos de tratamento de água e esgoto tornam-se essenciais para sustentar as civilizações contemporâneas, pois permitem a adequação da água de diferentes mananciais aos seus padrões de consumo e reduzem os impactos de seus efluentes no meio ambiente. Para tal, o tratamento da água pode envolver várias etapas, como coagulação, floculação, decantação e filtração. No caso do tratamento de esgoto, após a coleta e retirada de areia e sólidos grosseiros, os processos visam a redução da demanda bioquímica de oxigênio e a eliminação de microrganismos patogênicos, respectivamente por meio da retirada de matéria orgânica e aplicação de métodos de desinfecção.

No entanto, nos países em desenvolvimento, um dos principais problemas de poluição ainda é a matéria orgânica proveniente dos esgotos domésticos. Um dos motivos que contribuiu para a consolidação deste cenário é o fato de que, historicamente, evidenciou-se que os riscos à saúde são mais intensos quanto maior for a densidade populacional, e assim, grande parte das inovações tecnológicas

relacionadas ao saneamento básico foram desenvolvidas para atender às grandes cidades. Portanto, é importante buscar alternativas que viabilizem o tratamento de efluentes e o acesso à água em quantidade e com a qualidade necessária para que, não só os centros urbanos sejam atendidos, mas também outras localidades. Dessa forma, as estações de tratamento de pequeno porte, por demandarem menores valores de investimento e espaço físico, podem contribuir de modo significativo para a universalização do acesso à água potável no país.

Neste ponto, é importante distinguir as estações de tratamento de pequeno porte (ou compactas) dos sistemas de tratamento em escala descentralizada. Estes últimos são equipamentos voltados para utilização domiciliar, sendo que o fluxo de tratamento ocorre por exclusiva ação da gravidade e geralmente não ultrapassa 5 L min^{-1} . Por sua vez, as estações de tratamento compactas abordadas neste trabalho são estruturas maiores que, em geral, fazem uso de válvulas e bombas elétricas, produzindo fluxos que podem superar 700 L min^{-1} e, portanto, com capacidade para atender comunidades isoladas, fazendas, processos industriais, universidades, hotéis, hospitais etc.

Entretanto, o custo operacional de uma estação de tratamento compacta, seja ela de água ou esgoto, pode inviabilizar economicamente sua implantação. Por exemplo, a necessidade de manter atributos como turbidez, pH, oxigenação, concentração de cianobactérias e coliformes dentro dos padrões demanda que as tarefas de medição desses atributos e de dosagem de produtos químicos sejam frequentemente executadas. Desta forma, surge o seguinte dilema: se, por um lado, os sistemas de monitoramento e controle automático atualmente disponíveis no mercado apresentam custos de instalação e manutenção relevantes, por outro, análises e atuações manuais demandam a dedicação praticamente constante de um técnico laboratorista.

Em outras palavras, pode-se dizer que a decisão e a execução da dosagem de alguns produtos químicos importantes para os processos de tratamento de água

e esgoto representam um obstáculo para a implantação de estações compactas. Portanto, o principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de metodologias ópticas para a medição de parâmetros relacionados a estes processos, de forma que seja possível utilizá-las para compor sistemas de automação de baixo custo, que possam contribuir para a viabilidade econômica das estações de tratamento de pequeno porte.

1.2 Objetivos

Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de metodologias ópticas aplicáveis à medição de atributos relacionados aos processos de tratamento de água e esgoto, incluindo a montagem de protótipos e a implementação de aplicativos que contribuam para a viabilidade econômica de sistemas de automação capazes de manter tais atributos abaixo de seus respectivos limites.

Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Possibilitar a medição de turbidez de diversos tipos de líquido por meio de componentes alternativos em relação à tecnologia empregada nos medidores tradicionais.
- Desenvolver uma técnica que viabilize a implementação de algoritmos *fuzzy* em Controladores Lógico-Programáveis (CLPs) de pequeno porte, abrindo caminho para o uso desses algoritmos em sistemas de automação de baixo custo.

- Controlar a dosagem de produto coagulante em um processo de tratamento de água de acordo com a vazão e a turbidez de seu afluente, integrando os dois objetivos anteriores por meio do projeto e da construção de um protótipo de medidor e de uma planta piloto controlada por um CLP.
- Investigar a viabilidade da técnica conhecida como *biospeckle laser* como fonte de informação sobre a concentração de microrganismos em efluentes submetidos a processos de desinfecção, dando início ao desenvolvimento de um sistema de dosagem automática de produtos derivados do cloro.

1.3 Estrutura da Tese

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: a seguir, na Seção 2, são apresentados alguns conceitos fundamentais sobre os processos de tratamento de água e esgoto, seus sistemas de automação e sobre estações de tratamento compactas. Além disso, são descritos alguns aspectos relacionados ao fenômeno conhecido como *speckle* dinâmico, incluindo as técnicas de processamento de imagens utilizadas para analisá-lo.

Os três capítulos seguintes são baseados em artigos científicos elaborados com a participação deste autor, com objetivo de propor soluções para o controle de turbidez em processos de tratamento de água por meio de sistemas de automação de baixo custo. Respectivamente, seus temas são:

- Capítulo 2 – Desenvolvimento de uma metodologia alternativa para medição de turbidez, baseada em processamento de imagens;
- Capítulo 3 – Proposição de um algoritmo *fuzzy* que possa ser implementado em CLPs de pequeno porte e que, entre outras aplicações, possa ser usado para controlar um sistema de dosagem de produto coagulante a partir dos dados fornecidos pela técnica de medição proposta no trabalho anterior;

- Capítulo 4 – Integração dos dois trabalhos anteriores para a obtenção de um sistema automático de dosagem de produto coagulante e avaliação de seu desempenho por meio de uma planta piloto capaz de reproduzir mudanças nas condições de vazão e turbidez da água submetida à um suposto processo de tratamento.

O Capítulo 5 também se baseia em um artigo científico elaborado com a participação deste autor, no qual um ciclo de trabalho similar ao formado pelos três capítulos anteriores é iniciado a partir do desenvolvimento de uma metodologia óptica para a avaliação do nível de atividade biológica em efluentes submetidos à etapa de desinfecção dos processos de tratamento de esgoto. A proposta é permitir que, similarmente ao controle de turbidez, um sistema de dosagem automática de produtos derivados do cloro possa ser desenvolvido com baixo custo financeiro.

Em conclusão, no Capítulo 6, são apresentadas considerações finais sobre o presente trabalho, incluindo comentários sobre suas principais contribuições e indicações de possíveis temas para trabalhos futuros. Encerrando o documento, encontram-se, no Apêndice A, os projetos que detalham os aspectos elétricos e de *software* da planta piloto utilizada no Capítulo 4.

2 FUNDAMENTOS

2.1 Tratamento de Água

A água é um elemento essencial à vida, no entanto, por servir como veículo para vários agentes biológicos e químicos, pode trazer riscos à saúde dos seres que a consome. Dessa forma, o homem deve estar atento aos fatores que podem interferir negativamente na qualidade da água que ingere (HELLER; COLOSIMO; ANTUNES, 2003) e que utiliza em suas atividades agrícolas e pecuárias. Por ser fundamental para a saúde e higiene, o acesso à água tratada é um fator que caracteriza a qualidade de vida de uma população, sendo também considerado um indicador universal de desenvolvimento sustentável (SALGE et al., 2007). Apesar desses fatos serem amplamente conhecidos e divulgados, a água potável está cada vez mais escassa, em decorrência do aumento da população mundial e da intervenção ativa do homem nos ambientes urbano e rural (AMARAL; ROSSI et al., 2006).

Em termos de poluição de origem urbana, destacam-se como fontes mais relevantes os lançamentos de efluentes residenciais e industriais não tratados, a drenagem de vias públicas e possíveis vazamentos em redes coletoras de esgoto, depósitos de resíduos sólidos, lagoas de estabilização e postos de combustíveis (LIBÂNIO, 2010, p. 123). Além disso, nas regiões altamente industrializadas, a poluição atmosférica pode contribuir para o fenômeno da chuva ácida que, entre outros problemas, altera o pH dos corpos d'água (SINGH; ELUMALAI; PAL, 2016).

Por outro lado, o deflúvio superficial agrícola, constituído de poluentes como sedimentos, fertilizantes, agroquímicos e dejetos animais, é uma das principais causas da degradação dos mananciais localizados em zonas rurais. De forma mais específica, dois dos principais problemas são: o aumento da atividade primária das plantas e algas em decorrência da eutrofização, podendo causar a

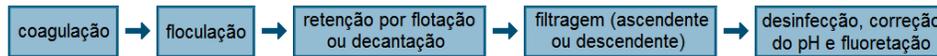
liberação de toxinas e alterações no sabor e odor da água; e a contaminação por produtos químicos e metais pesados, podendo levar à intoxicações imediatas ou por efeito acumulativo.

Nas últimas décadas, esses problemas têm se agravado continuamente, exigindo a aplicação de medidas de tratamento às águas destinadas ao consumo humano e suas atividades de cultivo e produção de alimentos (MARTIRANI; PERES, 2016). Portanto, os sistemas modernos de abastecimento são geralmente caracterizados pela retirada da água da natureza, adequação de sua qualidade, armazenamento e distribuição, sendo de fundamental importância em regiões urbanas e rurais (HELLER; PÁDUA, 2010, p. 73).

Normalmente, a etapa de adequação de qualidade é realizada por meio das Estações de Tratamento de Água (ETAs), nas quais geralmente são empregadas combinações (LÖFFLER et al., 2005) de métodos como coagulação, floculação, sedimentação, filtração (CRISAFULLY et al., 2008), processos de troca iônica, adsorção com carvão ativado, separação por membrana, biodegradação, fotodegradação (ZANAROTTO et al., 2007) e processos eletroquímicos (TARLEY; ARRUDA, 2003). A escolha dos métodos a serem utilizados em uma ETA depende de diversos aspectos, destacando-se os atrelados à localização da estação, como temperatura, turbidez e tipo de substância a ser removida da água captada, e também os estipulados para o produto final, como demanda e qualidade (BELISÁRIO et al., 2009).

No Brasil, a tecnologia mais utilizada é o tratamento de ciclo completo, também denominado como tratamento convencional, empregando a sedimentação estimulada por produto coagulante e etapas bem definidas (LIBÂNIO, 2010, p. 148), conforme a sequência mostrada na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Fluxograma típico da tecnologia de tratamento de ciclo completo, também conhecido como tratamento convencional, empregado na maioria das ETAs do Brasil.



Fonte: Libânio (2010, p. 148).

A coagulação é um processo que visa a desestabilização de partículas coloidais não sedimentáveis, reduzindo a probabilidade de repulsão entre elas e favorecendo a formação de partículas maiores, denominadas “flocos” (MATILAINEN; VEPSÄLÄINEN; SILLANPÄÄ, 2010). O objetivo é facilitar a remoção de impurezas como sílica, bactérias e oocistos de protozoários, o que também contribui para a diminuição da turbidez (VIEIRA et al., 2009). Diversos fatores interferem no processo de coagulação, destacando-se o pH, a natureza das partículas coloidais, o tamanho e distribuição dessas partículas, além do tipo e da dosagem dos produtos químicos aplicados (DI BERNARDO; BOTARI; SABOGAL, 2005; SANTOS et al., 2007). Mais de 90 % das estações de tratamento atualmente em operação utilizam os processos de coagulação e floculação, sendo que os sais de alumínio e ferro são os agentes coagulantes mais empregados (JULIO et al., 2010).

A floculação é materializada na mistura lenta do coagulante, favorecendo as colisões entre partículas. O objetivo é permitir que as partículas previamente desestabilizadas se agreguem de modo a formar flocos que possam sedimentar (ou flotar). Para que a operação de floculação ocorra de forma satisfatória, é necessário fornecer energia mecânica em quantidade bem estabelecida, permitindo que os flocos possam aumentar seu tamanho, ao invés de se separarem (CARDOSO; BERGAMASCO et al., 2008; GOMES, 2011).

A decantação é a operação que traduz a eficiência das etapas anteriores, fornecendo condições para que os flocos formados nestas últimas se depositem

por ação da gravidade. Embora contemplado na Figura 1.1, o emprego da flotação em estações voltadas ao abastecimento público ainda é inexpressivo no Brasil, melhor se aplicando em situações nas quais a água captada apresenta elevadas concentrações de algas que reduziriam a sedimentação dos flocos (LIBÂNIO, 2010, p. 148).

Por sua vez, a etapa de filtração resulta da ação conjunta dos fenômenos de deslocamento e aderência das partículas em suspensão, que se pretende remover. Em geral, o regime de escoamento adotado é laminar, de modo que as partículas se movam ao longo de linhas de corrente. Para que sejam removidas, é necessário que os mecanismos de transporte desviem as trajetórias das partículas, conduzindo-as ao meio filtrante. Além disso, as forças que tendem a mantê-las aderidas ao coletor devem superar as que atuam no sentido de desprendê-las (DALSSASSO; SENS, 2006).

Finalmente, a desinfecção tem o objetivo de produzir águas isentas de microrganismos patogênicos, cuja inativação realiza-se por intermédio de agentes físicos e/ou químicos (BETANCOURT; ROSE, 2004). Por ser um produto que atende a vários critérios desejáveis, o cloro, sob diversas formas, tornou-se o agente químico mais usado nos processos de tratamento de água em todo o planeta, ao ponto de favorecer a identificação do processo de desinfecção como “cloração” (LIBÂNIO, 2010, p. 428). Muitas vezes, o tratamento é completado através da correção do pH e da fluoretação¹. As motivações são de amplo conhecimento e, respectivamente, podem ser resumidas na redução das características corrosivas da água e da incidência de cárie dentária.

De acordo com Libânio (2010, p. 146), outras tecnologias convencionais para o tratamento de água podem ser entendidas com simplificações da tecnologia de ciclo completo, sendo elas:

¹ O valor de referência estabelecido pela *World Health Organization* é de 1,5 mg L⁻¹, devendo ser adaptado de acordo com alguns fatores locais (FAWELL et al., 2006, p. 37).

- Filtração direta – A principal diferença que esta tecnologia apresenta em relação ao tratamento de ciclo completo é a ausência da etapa de decantação e, sendo assim, a sequência empregada torna-se: coagulação, floculação, filtração (ascendente ou descendente) e desinfecção. Como a remoção dos sólidos é realizada somente nos filtros, cujo desempenho é influenciado de forma significativa pela etapa de coagulação, a manutenção desses sistemas tende a ser mais simples do que daqueles que utilizam a etapa de decantação. No entanto, tal tecnologia apresenta limitações quanto às características da água bruta, especialmente quando esta apresenta valores elevados de turbidez ou alta concentração de algas (TEIXEIRA et al., 2005).
- Filtração direta em linha – Neste caso, a etapa de floculação também é suprimida e o fluxo de tratamento resume-se em: coagulação, filtração (ascendente ou descendente) e desinfecção. Devido à desproporção de volumes, esta simplificação construtiva não traz prejuízo à dissolução do agente coagulante na água. No entanto, com a ausência dos tanques de floculação, o funcionamento dos filtros pode ser prejudicado pela redução da homogeneidade e do tempo de contato entre essas substâncias.
- Filtração lenta – Além das duas simplificações anteriores, com a retirada da etapa de coagulação, esta tecnologia pode ser entendida apenas pela associação da filtração com a desinfecção. No entanto, neste caso, é normal ocorrer a inclusão de uma etapa não utilizada nas tecnologias anteriores, sendo o fluxo descrito por: pré-filtração, filtração e desinfecção. Esta última configuração é denominada “Filtração em Múltiplas Etapas” (FiME) e, de acordo com Veras e Di Bernardo (2008a), é uma tecnologia adequada às zonas rurais e pequenos e médios municípios. No entanto, segundo Libânio (2010, p. 147), apesar do baixo custo operacional, os custos de implantação são similares aos dos sistemas descritos anteriormente.

2.2 Tratamento de Esgoto

Tão importante quanto tratar a água que abastece uma população é tratar a água residuária que esta mesma população produz, reduzindo o impacto que estes resíduos causam nos corpos hídricos que os recebem e, inclusive, facilitando o abastecimento de outras populações, localizadas à jusante da primeira (ANDERSON, 2003). Dentre os principais poluentes encontrados nos efluentes produzidos em regiões urbanas e rurais, pode-se destacar (VON SPERLING, 2014, p. 46): matéria orgânica, aumentando a demanda bioquímica de oxigênio; nutrientes como nitrogênio e fósforo, que propiciam o crescimento excessivo de algas; agentes patogênicos, como bactérias, protozoários e ovos de helmintos; pesticidas, detergentes e metais como cádmio, níquel e chumbo, que podem causar intoxicações agudas ou a longo prazo.

Dos poluentes mencionados, a matéria orgânica proveniente dos esgotos domésticos possivelmente representa o principal problema de poluição das águas nos países em desenvolvimento. As quantidades introduzidas em um corpo d'água tendem a ser estabilizadas pelas bactérias decompositoras, que utilizam o oxigênio disponível no meio líquido para sua respiração. Quando este processo excede a capacidade de *autodepuração* do curso d'água, o decréscimo da concentração de oxigênio tem diversas implicações do ponto de vista ambiental (VON SPERLING, 2014, p. 134), entre elas a mortandade de peixes e a degradação das condições sépticas da água.

Além disso, também em decorrência da falta de tratamento dos esgotos domésticos, a disseminação de agentes patogênicos e de nutrientes, que fomentam o crescimento de algas, ainda ocorre de maneira impactante em países como o Brasil. A contaminação por patógenos pode não gerar um impacto à biota do corpo d'água em si, mas afeta alguns de seus usos preponderantes, como potabilidade, irrigação e balneabilidade. No caso das algas, os maiores problemas estão relacionados ao fato de que elas dificultam os processos de tratamento para

abastecimentos residenciais e industriais, inclusive elevando seus custos. Além disso, em períodos noturnos, as algas deixam de fazer fotossíntese e passam a consumir oxigênio, o que também pode levar a eventuais mortandades de peixes (VON SPERLING, 2014, p. 200).

Desta forma, as capacidades de assimilação dos corpos hídricos receptores podem ser utilizadas até um ponto aceitável e não prejudicial, sendo que um dos indicadores mais utilizados para estabelecê-lo é a quantidade de Oxigênio Dissolvido (OD) que, por exemplo, para águas doces destinadas à proteção de comunidades aquáticas, não pode ser inferior a 5 mg L^{-1} (BRASIL, 2005). Ao ultrapassar este limite, o lançamento de cargas poluidoras deve ser reduzido por meio de um sistema de tratamento. Basicamente, existem duas variantes dos sistemas de esgotamento sanitário: os descentralizados, que pressupõem o atendimento unifamiliar ou a um número reduzido de residências e que, por envolver infiltração no solo, têm sua correta aplicação limitada às localidades de baixa densidade ocupacional e que não possuam o lençol freático muito próximo à superfície, sendo que esta distância depende da técnica utilizada (HELBEL; NUNES; MARCHETTO, 2008); e os sistemas coletivos, que são indicados para locais com elevada densidade populacional e consistem de tubulações que transportam o efluente das residências e demais instalações ao seu destino final, desejavelmente uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) (VON SPERLING, 2014, p. 52).

Os processos de tratamento realizados nas ETEs (assim como no caso das ETAs) podem ocorrer por meio de diferentes métodos, tecnologias e combinações. Usualmente, estes processos podem ser classificados nos níveis de tratamento apresentados a seguir, o que facilita a compreensão de seus objetivos.

- Tratamento Preliminar – Destina-se à remoção de sólidos grosseiros e areia, através de mecanismos de ordem física. Além disso, é usual que esta etapa inclua uma forma de apurar a vazão do esgoto que entra na estação, em

geral, por meio de uma Calha *Parshall* (VON SPERLING, 2014, p. 277). A Figura 1.2 apresenta um fluxograma típico dos elementos mencionados.

Figura 1.2 – Fluxograma dos elementos típicos da etapa de tratamento preliminar de uma Estação de Tratamento de Esgoto.



Fonte: Von Sperling (2014, p. 277).

- Tratamento Primário – Após o tratamento preliminar, o efluente ainda contém sólidos em suspensão não grosseiros, constituídos por um alto percentual de matéria orgânica. No tratamento primário, cerca de 60 a 70 % desses sólidos podem ser removidos, o que causa uma redução entre 25 e 35 % na demanda biológica de oxigênio (DBO), favorecendo o tratamento secundário. Em geral, esta remoção ocorre em tanques de decantação, nos quais o esgoto é forçado a fluir vagarosamente, de forma que os sólidos em suspensão, possuindo uma densidade maior do que a do líquido em movimento, sedimentem gradualmente e possam ser recolhidos (VON SPERLING, 2014, p. 282). A eficiência desta etapa pode ser aumentada com o uso de processos físico-químicos de coagulação e floculação, o que altera sua denominação para CEPT (do termo em inglês, *Chemically Enhanced Primary Treatment*).
- Tratamento Secundário – Nesta etapa, o objetivo continua a ser a remoção da matéria orgânica: tanto a que se encontra em suspensão, mas que devido à sedimentabilidade mais lenta não foi retirada na etapa anterior; quanto a que se encontra dissolvida e não pode ser removida por processos físicos. Portanto, o tratamento secundário é uma etapa essencialmente biológica, na qual a decomposição dos poluentes é alcançada por mecanismos similares aos que ocorrem nos corpos hídricos, no entanto de forma acelerada e

controlada. A base do processo é criar condições para que microrganismos como bactérias, protozoários e fungos consumam a matéria orgânica, convertendo-a em dióxido de carbono e água (nos sistemas aeróbios) ou em dióxido de carbono e metano (nos sistemas anaeróbios). Para tal, há uma grande variedade de métodos, sendo os mais comuns (VON SPERLING, 2014, p. 286):

- Lagoas de estabilização e variantes;
- Processos de disposição sobre o solo;
- Sistemas alagados construídos (*wetlands*);
- Lodos ativados e variantes;
- Reatores anaeróbios;
- Reatores aeróbios com biofilmes.

Atualmente, entre estes métodos, o uso de reatores anaeróbios do tipo UASB (do termo em inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) é uma tendência no Brasil. Nestes reatores, a concentração de biomassa é bastante elevada (justificando a denominação “manta de lodo”), o que reduz a necessidade de espaço físico em comparação com os outros métodos. Além disso, sua eficiência permite reduções de até 70 % da DBO do esgoto proveniente do tratamento *preliminar*, abrindo caminho para que esta tecnologia elimine, com vantagens, toda a etapa de tratamento primário (VON SPERLING, 2014, p. 285).

- Tratamento Terciário – Destina-se à remoção de nutrientes, microrganismos patogênicos e poluentes específicos, como compostos não biodegradáveis e metais pesados. Além disso, esta etapa pode complementar a retirada de poluentes não removidos no tratamento secundário (VON SPERLING, 2014, p. 281). De forma recíproca, é importante observar que a remoção

de nutrientes ocorre naturalmente por ação biológica na etapa secundária, devendo ser classificada como parte do tratamento terciário apenas quando existem mecanismos específicos para complementar esta tarefa. Por sua vez, a remoção de microrganismos patogênicos é uma prática que busca a adequação dos esgotos sanitários aos padrões de qualidade estabelecidos para diferentes situações, ou seja, apesar da possibilidade de se atingir elevadas taxas de remoção, na maioria das situações o objetivo não é a esterilização do efluente, mas sim permitir que a água volte para os corpos hídricos sem causar impacto ou que possa ser reutilizada para irrigação de jardins ou limpeza de calçadas, por exemplo. Para tal, os principais métodos utilizados são (VON SPERLING, 2014, p. 347):

- Lagoas de maturação;
- Infiltração no solo;
- Cloração;
- Ozonização;
- Radiação ultravioleta.

Neste ponto, é importante ressaltar que a cloração é o método mais utilizado para a desinfecção de águas e esgotos, ocorrendo por meio da aplicação de cloro gasoso, hipoclorito de sódio ou de cálcio ou outros compostos (FORMISANO et al., 2016). A ação desinfetante é bastante eficiente e se dá pelo mecanismo de oxidação celular, porém, quando o cloro entra em contato com a matéria orgânica presente nos efluentes das ETEs, ocorre a formação de compostos potencialmente prejudiciais a saúde humana, como os trihalometanos e haloacetônitrilas (VON SPERLING, 2014, p. 281). Portanto, para evitar desperdícios e minimizar inconvenientes como este, sistemas automáticos de dosagem de cloro podem ser considerados como elementos de grande importância nos processos de tratamento atuais.

2.3 Automação de Estações de Tratamento

Conceitos Gerais

A implantação de um sistema de automação pode trazer benefícios para todas as etapas dos processos de tratamento de água e esgoto descritos nas Seções 2.1 e 2.2. Quando não é possível ou interessante atuar de forma automática em alguma etapa, ganhos operacionais podem ser obtidos com a monitoração e registro de grandezas físicas como nível, vazão e temperatura, ou por meio de interfaces que permitam aos operadores aplicar suas decisões de forma remota, liberando-os de estarem presentes no local do processo a cada intervenção, como proposto em Dieu (2001).

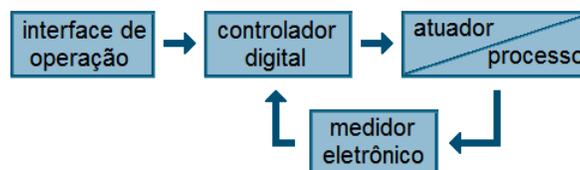
Alguns exemplos de atuação automática nos processos de tratamento de água são: controle da vazão de entrada do processo por meio de válvulas proporcionais ou de inversores de frequência, que ajustam a velocidade das bombas de captação (TIWARI; ADAMOWSKI, 2013); dosagem de produto coagulante de acordo com a turbidez do afluente (NAM et al., 2013); controle da velocidade de misturadores motorizados na etapa de floculação (ROSSINI; GARRIDO; GALLUZZO, 1999; FRANCESCHI et al., 2002); decisões de iniciar e finalizar a operação de retrolavagem dos filtros (BURLINGAME; PICKEL; ROMAN, 1998) e bombeamento autônomo da água tratada para o reservatório de distribuição, quando há demanda para tal.

Nos processos de tratamento de esgoto, a atuação automática pode definir o momento e a intensidade de bombeamento das estações elevatórias, inclusive fazendo a gestão de prioridades nos casos em que duas ou mais dessas estações são utilizadas para alimentar um mesmo processo de tratamento. Nos tanques de decantação, a velocidade de circulação e a disposição do lodo também podem ser automatizadas (NEIS; TIEHM, 1997; SOVA; WILSON; CRISLER, 2008). De forma geral, a etapa de tratamento biológico envolve a manutenção de condições propícias para que bactérias aeróbias se desenvolvam, sendo que o uso de sistemas

de aeração com motores elétricos é bastante comum. Nestes casos, o controle de velocidade dos motores é de grande interesse, visto que a energia elétrica que eles consomem representa aproximadamente 50 % do total consumido pelas estações de tratamento convencionais (HAMITLON et al., 2006). Além disso, o uso racional dos derivados do cloro foi indicado como uma tendência para a etapa de desinfecção, uma vez que o controle eficiente da dosagem pode reduzir o consumo desses produtos químicos e os efeitos indesejados de sua aplicação, como a formação de trihalometanos (HUA; YEATS, 2010).

Essencialmente, a atuação automática em processos de tratamento de água e esgoto não difere dos demais processos industriais, uma vez que os sistemas de automação modernos se baseiam em medidores eletrônicos, controladores digitais e atuadores como motores e válvulas, conforme mostrado na Figura 1.3. Para diversos pontos de atuação, a filosofia utilizada pelo controlador digital é a mesma: monitorar o ambiente por meio de dados recebidos do medidor, considerar decisões e configurações recebidas da interface de operação, processar o programa computacional armazenado em sua memória e atualizar o sinal enviado ao atuador, que efetivamente interfere no processo (FRANCHI; DE CAMARGO, 2009, p. 24). Exemplos e descrições mais detalhadas sobre medidores, atuadores, controladores e interfaces de operação são fornecidos nos próximos tópicos.

Figura 1.3 – Fluxograma típico de um sistema de atuação automática.



Fonte: Adaptado de Silva (2015, p. 3).

Medidores e Atuadores

Os medidores (ou instrumentos de medição) eletrônicos são dispositivos responsáveis por monitorar o mundo real por meio de elementos sensores, que mudam suas características de acordo com a intensidade da grandeza física a ser aferida (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011, p. 17). Um exemplo são os cristais piezoresistivos, que alteram sua condutividade elétrica a medida em que são deformados pela pressão a qual estão submetidos (BARLIAN et al., 2009). Pequenas variações nessas características são então condicionadas por circuitos eletrônicos, que as transformam em sinais elétricos padronizados e assim, uma pressão que varia entre 10 e 500 mmCA pode resultar em uma tensão entre 0 e 10 V. Nos últimos anos, as saídas elétricas vêm sendo substituídas pela capacidade de comunicação via rede, permitindo que os valores apurados sejam transmitidos aos controladores com mais confiabilidade. Desta forma, pode-se entender que um medidor é formado pelo elemento sensor e pelos circuitos responsáveis por converter as variações deste último em um sinal inteligível, seja ele analógico ou digital (AGUIRRE, 2007, p. 313).

Vários tipos de medidores são empregados nos processos de tratamento de água e esgoto. Alguns podem ser considerados mais gerais, visto que são encontrados com maior frequência em diversos outros processos automatizados, como os medidores de nível, vazão e temperatura. Outros, como os de turbidez, oxigenação e de concentração de produtos derivados do cloro são mais específicos e, de forma geral, acabam possuindo um valor financeiro mais elevado. Portanto, assim como proposto neste trabalho, buscas por novas técnicas de medição que transponham esta última característica são de grande interesse (HSU et al., 2014; EHGARTNER et al., 2014).

Por sua vez, os atuadores são os elementos que efetivamente interferem no processo. Exemplos comuns são as válvulas, os motores elétricos e os resistores de aquecimento e, de forma mais específica para os processos de tratamento de

água e esgoto, as bombas eletromagnéticas para dosagem de produtos químicos e as lâmpadas ultravioleta. Em geral, duas alimentações elétricas são utilizadas por cada atuador: uma de potência e uma de controle (MOBUS; KALTON, 2014, p. 286). Por exemplo, no caso de algumas bombas dosadoras, a energia necessária para transportar o fluido do tanque de armazenamento até o local em que é adicionado ao processo é retirada de uma fonte de alimentação de corrente alternada (110 V ou 220 V), ao passo que a vazão do produto a ser dosado é determinada por um sinal de corrente contínua, geralmente enviado pelo controlador digital dentro de um intervalo padronizado, como 4 mA para a vazão mínima e 20 mA para a vazão máxima. Porém, assim como no caso dos medidores, existe uma tendência que indica a substituição de sinais analógicos de controle por sinais digitais (AGUIRRE, 2007, p. 333). Dessa forma, um atuador dito “inteligente” continua a utilizar a alimentação de potência, mas comunica-se com o controlador digital via rede de dados.

Controladores Lógico-Programáveis e Algoritmos de Controle

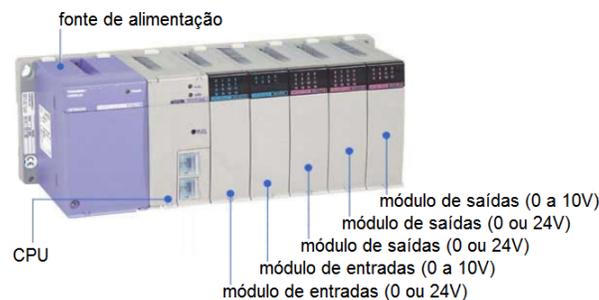
Os controladores digitais utilizados em sistemas de automação possuem uma quantidade razoável de similaridades com os microcomputadores convencionais. Em ambas as categorias, os principais componentes são os microprocessadores, para interpretação de instruções pré-programadas; os dispositivos de memória volátil e não volátil, respectivamente para o armazenamento de dados permanentes e temporários; e circuitos eletrônicos secundários, como as placas de rede, para comunicação com aparelhos similares. No entanto, outros aspectos são bastante distintos, sendo os propósitos e formas de interface com o mundo real o principal ponto a ser destacado nesta questão. Enquanto os microcomputadores possuem dispositivos como teclado, *mouse* e monitor, para interface com os seres humanos, os controladores digitais possuem

entradas e saídas elétricas, para que conexões com medidores e atuadores sejam estabelecidas (REHG; SARTORI, 2009, p. 5).

Atualmente, existem dois principais tipos de controladores digitais, os microcontroladores e os Controladores Lógico-Programáveis (CLPs). Os primeiros são voltados para sistemas de automação residencial ou para sistemas embarcados, como em aparelhos de diagnóstico por imagens, veículos automotores, eletrodomésticos e brinquedos (YADAV; SINGH, 2004, p. 5). Os CLPs, por sua vez, são utilizados nos mais diversos segmentos industriais (FRANCHI; DE CAMARGO, 2009, p. 28), como extrativista, siderurgico, petroquímico, alimentício, sendo também os mais comumente encontrados nos processos de tratamento de água e esgoto (LIBÂNIO, 2010, p. 143).

Em grande parte, esta vasta gama de utilização dos CLPs se deve às suas características de robustez e modularidade, pois são dispositivos preparados para operar em ambientes não climatizados e na presença de outras adversidades, como partículas em suspensão e vibrações moderadas, além de permitirem expansões e manutenções por meio de módulos que podem ser adquiridos separadamente (FRANCHI; DE CAMARGO, 2009, p. 29), conforme ilustrado na Figura 1.4.

Figura 1.4 – Controlador Lógico-Programável composto por uma fonte de alimentação, uma Unidade Central de Processamento (CPU), dois módulos para conexões de sinais elétricos de entrada e três módulos para conexões de sinais elétricos saída.



Fonte: Adaptado de Petruzella (2014, p. 16).

Como pode ser observado na figura anterior, um CLP pode ser configurado com vários módulos de entradas e saídas elétricas, o que permite que ele controle uma grande quantidade de atuadores a partir de informações extraídas dos sinais recebidos de diversos medidores. Desta forma, é normal que um CLP execute um algoritmo de controle automático para cada atuador conectado às suas saídas, merecendo destaque as estratégias de Controle On/Off, PID e *Fuzzy*, geralmente implementadas de acordo com as descrições a seguir.

- Controle On/Off – É uma estratégia simples, que consiste em ligar e desligar um equipamento (ou abrir e fechar, no caso das válvulas) com o objetivo de manter uma determinada grandeza física dentro de uma faixa desejada (OGATA, 2010, p. 22). Por exemplo, para manter o nível de esgoto no reservatório de uma estação elevatória dentro do intervalo entre 20 e 50 %, o valor aferido para esta grandeza determina os momentos de acionar e interromper o funcionamento de uma bomba elétrica.
- Controle PID – O objetivo é manter a grandeza controlada o mais próximo possível de um ponto desejado, comumente chamado de *setpoint*. Para isso, o controlador trabalha com o sinal denominado *erro*, que representa a diferença entre o valor desejado e o valor real da grandeza, proveniente do medidor que a monitora (OGATA, 2010, p. 8). O sinal de controle enviado ao atuador é composto pela soma de três operações realizadas com o sinal de erro, tomando-se sua proporção *P*, a integral de sua curva temporal *I* e sua derivada em relação ao tempo *D*, daí o nome Controlador PID (OGATA, 2010, p. 567). A medição da grandeza controlada, a comparação com o valor desejado, as operações matemáticas mencionadas e consequentemente a atualização do sinal de controle podem ocorrer várias vezes por segundo, levando o controlador a rejeitar distúrbios que poderiam influenciar um sistema de controle não realimentado e caracterizando esta estratégia como controle em malha fechada (GOPAL, 2008, p. 3). Por exemplo, se um

operador determina que o fluxo de entrada de uma ETA deve ser de 9 L s^{-1} e o medidor afere uma vazão 10 L s^{-1} , o erro instantâneo é negativo e levará o controlador a ajustar o sinal de controle enviado à bomba de captação, reduzindo sua velocidade. Em outra situação, se esta bomba perde eficiência ao longo do tempo, devido a desgastes mecânicos, o controle em malha fechada tentará compensar este problema de forma natural, impondo velocidades cada vez maiores para manter a mesma vazão.

- Controle *Fuzzy* – Diferentemente das técnicas tradicionais, esta estratégia baseia-se na representação do conhecimento de um ou mais operadores a respeito de um determinado processo. Entre suas vantagens, destaca-se a facilidade de captura e implementação da natureza do processo de decisão humana, permitindo que a ação de controle seja projetada através de regras do tipo “SE - ENTÃO” (PASSINO; YURKOVICH, 1997, p. 10). Por exemplo, o comportamento desejado para um sistema de dosagem de produto coagulante em uma ETA pode ser descrito da seguinte forma:

SE	$F_{IN} = \text{baixa}$	E	$T_{IN} = \text{baixa}$	ENTÃO	$F_{OUT} = \text{baixa}$
SE	$F_{IN} = \text{baixa}$	E	$T_{IN} = \text{alta}$	ENTÃO	$F_{OUT} = \text{média}$
SE	$F_{IN} = \text{alta}$	E	$T_{IN} = \text{baixa}$	ENTÃO	$F_{OUT} = \text{média}$
SE	$F_{IN} = \text{alta}$	E	$T_{IN} = \text{alta}$	ENTÃO	$F_{OUT} = \text{alta}$

em que F_{IN} e T_{IN} são a vazão e a turbidez na entrada do tratamento e F_{OUT} é a vazão de produto coagulante. Desta forma, o procedimento do controlador é (REYES, 2004, p. 17): 1) determinar as pertinências dos valores de vazão e turbidez fornecidos pelos medidores em relação à seus respectivos conjuntos “baixa” e “alta”; 2) calcular os coeficientes de disparo das regras descritas acima, atribuindo pesos aos conjuntos “baixa”, “média” e “alta”, que descrevem a vazão de produto coagulante; 3) ponderar estes

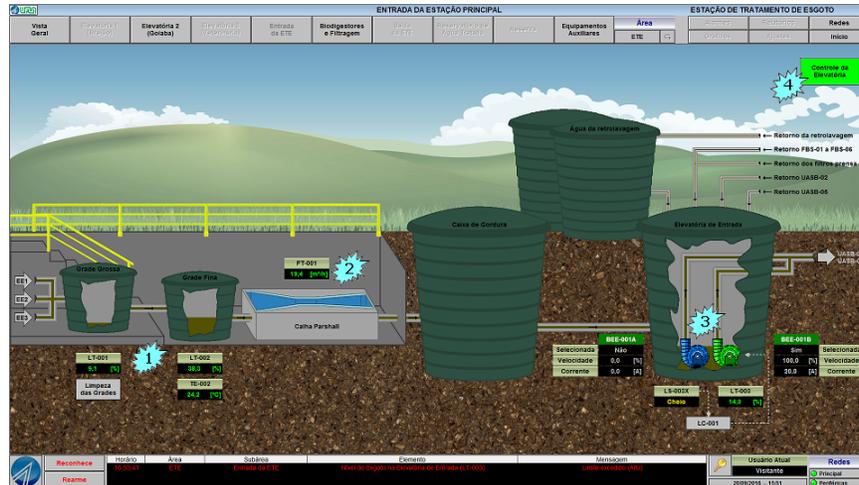
pesos de forma a encontrar um valor numérico que determina a intensidade de trabalho da bomba dosadora.

Além disso, é usual que os atuadores conectados aos CLPs possam ser operados em modo manual. Ou seja, quando um atuador está em modo automático, seu comportamento é regido por uma estratégia de controle, como as apresentadas acima; porém, quando o modo manual está selecionado para este atuador, suas manobras e sua intensidade de trabalho respeitam decisões humanas, aplicadas por meio de interfaces de operação, como as descritas a seguir.

Interfaces de Operação

A interface de operação de um sistema de automação é constituída por elementos que apresentam informações aos operadores ou permitem que estes apliquem suas decisões sobre o processo. Alguns exemplos desses elementos são botões, chaves seletoras, potenciômetros, lâmpadas, sirenes e indicadores de valores numéricos, sendo que os três primeiros podem ser interligados às entradas de um CLP (REHG; SARTORI, 2009, p. 33) e os demais às saídas (REHG; SARTORI, 2009, p. 69), assim como os medidores e atuadores. No entanto, atualmente, grande parte dos elementos de interface são implementados em ambiente computacional, no qual, entre outros benefícios, ocorre a virtualização dos mencionados componentes elétricos. Por meio de plataformas de desenvolvimento específicas, o processo que se deseja supervisionar pode ser representado por telas sinópticas, nas quais são inseridos objetos que indicam a situação atual ou permitem manobrar os equipamentos interligados ao CLP (SANTOS, 2014, p. 31), conforme exemplo mostrado na Figura 1.5 (observe que os numerais de 1 a 4 foram inseridos na nesta figura como referência para as descrições a sucedem).

Figura 1.5 – Tela sinóptica na qual são representados alguns elementos da etapa de tratamento preliminar e da elevatória interna da ETE instalada no *campus* da Universidade Federal de Lavras.

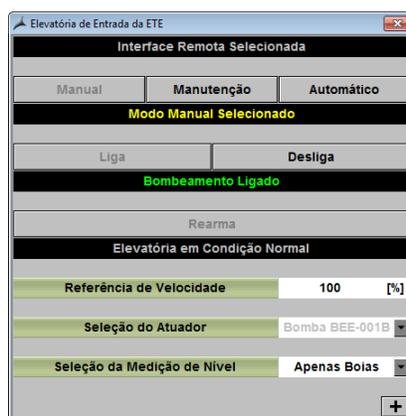


Fonte: Do autor (2017).

1. Representação do sistema de remoção de sólidos grosseiros composto por tanques nos quais estão contidos uma grade grossa e uma grade fina. Em ambos, o nível de esgoto é medido e indicado aos operadores, permitindo que entupimentos sejam detectados antes que causem transbordamento;
2. Apresentação numérica da vazão aferida pela Calha *Parshall* instalada na entrada da estação de tratamento;
3. Representação da elevatória interna da ETE, responsável por bombear o esgoto recebido para os reatores UASB. Neste caso, há indicação do nível deste reservatório e de várias condições das bombas, como velocidade de rotação, corrente elétrica, modo de operação selecionado (automático ou manual) e se estão ligadas, bloqueadas ou com defeito, sendo que estes últimos estados são mostrados alterando-se a cor dos objetos que as representam.

4. Botão virtual para abertura da janela de controle da elevatória interna, que disponibiliza aos operadores informações mais detalhadas sobre esta parte do sistema e objetos que permitem interferir em seu funcionamento, conforme mostrado na Figura 1.6.

Figura 1.6 – Janela de controle da elevatória interna da ETE em questão, por meio da qual é possível visualizar e selecionar seu modo de operação, ligar e desligar manualmente a bomba selecionada, alterar sua velocidade, entre outras operações.



Fonte: Do autor (2017).

Interfaces compostas por recursos como os mostrados nas Figuras 1.5 e 1.6 são conhecidas como Sistemas Supervisórios, Sistemas de Supervisão e Controle ou Sistemas SCADA (do termo em inglês, *Supervisory Control And Data Acquisition*). O funcionamento é viável pois os microcomputadores em que estes sistemas são executados comunicam-se via rede de dados com os CLPs, enviando e recebendo informações destes últimos (MORAES; CASTRUCCI, 2010, p. 120). As vantagens são muitas e entre elas estão a redução da quantidade de entradas e saídas elétricas dos CLPs, visto que componentes como lâmpadas e botões são substituídos por objetos virtuais, e a possibilidade de armazenar várias informações em banco de dados, formando um histórico do funcionamento do processo (MORAES; CASTRUCCI, 2010, p. 151). Este último recurso pode ser

usado, por exemplo, para registrar a evolução do nível de um tanque ao longo de uma década, bem como as mensagens de alarme disparadas quando este nível excedeu limites máximos e mínimos, permitindo inclusive análises que podem determinar em quais situações existe uma maior probabilidade destes eventos ocorrerem.

2.4 Estações de Tratamento Compactas

De acordo com os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) do ano de 2012, observa-se que o índice de cobertura por sistema de abastecimento de água tratada para a população urbana do Brasil é de aproximadamente 94 %, enquanto que, para a população rural, este índice encontra-se próximo a 33 % (IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2015, p. 100). Desta forma, é natural observar no mesmo levantamento que aproximadamente 56 % dos domicílios particulares rurais são abastecidos por poços ou nascentes, tornando esta população muito dependente das boas condições destes recursos naturais. No entanto, apesar desta dependência, o mesmo estudo mostra que a proporção de domicílios com esgotamento sanitário adequado é bem menor no meio rural do que no meio urbano, respectivamente 32 % e 84 %.

De forma específica, alguns reflexos desta situação podem ser percebidos em uma vasta gama de trabalhos, por exemplo:

- Na região Nordeste de São Paulo, análises de qualidade da água em 30 propriedades cuja principal atividade é a produção de leite mostraram os seguintes resultados: coletas nos períodos chuvosos evidenciaram que 90 % das amostras de água das fontes e reservatórios e 96,7 % da água destinada ao consumo humano estavam fora do padrão microbiológico de potabilidade. Durante períodos de estiagem, respectivamente, os resultados foram 83,3 % e 90 % (AMARAL; NADER et al., 2003);

- Rocha et al. (2006) avaliaram a qualidade da água na área rural do município de Lavras–MG e verificaram que 93 % das amostras apresentavam número de coliformes termotolerantes acima do padrão de potabilidade definido para o país;
- Em propriedades rurais localizadas na Região Sudoeste do Paraná, Campos et al. (2008) detectaram a presença de coliformes em 88 % das amostras de água analisadas, sendo que 75 % delas estavam contaminadas por coliformes termotolerantes e apenas 12 % estavam apropriadas para o consumo humano.

Um dos motivos que contribuiu para a consolidação deste cenário é o fato de que, historicamente, evidenciou-se que os riscos à saúde são mais intensos quanto maior for a densidade populacional, e assim, grande parte das inovações tecnológicas relacionadas ao saneamento básico foram desenvolvidas para atender as cidades ou aglomerados populacionais maiores. Além disso, segundo Rebouças (2000), o abastecimento de água nas zonas rurais tem sido abordado como uma extensão do modelo dominante nas cidades, perdendo-se de vista o grande alcance de alternativas como o auto-abastecimento (FRANCO, 2014) e a adoção de medidas distribuídas para o tratamento das águas já comprometidas (JORSARAEI; GOUGOL; VAN LIER, 2014).

Outra alternativa, que pode ser considerada como ponto intermediário entre as estruturas utilizadas nos centros urbanos e os sistemas de tratamento em escala descentralizada, consiste nas estações de tratamento de pequeno porte (ou compactas). Estas últimas ocupam um menor espaço físico e demandam menos investimentos do que as estações convencionais, sendo capazes de tratar volumes superiores a 700 L min^{-1} e portanto de atender a comunidades rurais, fazendas, hotéis, pequenas indústrias e outras localidades. Um exemplo é a ETA compacta que pode ser observada na Figura 1.7, localizada no *campus* da Universidade Federal de Lavras.

Figura 1.7 – Estação de tratamento de água Benedito Tibúrcio Barbosa, localizada no *campus* da Universidade Federal de Lavras, com capacidade para tratar aproximadamente 540 L min^{-1} .



Fonte: Do autor (2017).

Dessa forma, as estações de tratamento compactas podem contribuir de forma significativa para o equacionamento da questão do saneamento básico e consequente melhoria dos indicadores de desenvolvimento sustentável em países como o Brasil (VERAS; DI BERNARDO, 2008b). No entanto, existem obstáculos econômicos que podem restringir ou inviabilizar suas implantações, sendo o custo da mão-de-obra operacional um dos principais.

Em relação a este último aspecto, a adoção de um sistema de automação pode ser notoriamente impactante, podendo-se constatar que há um compromisso entre os custos de aquisição e manutenção dos equipamentos envolvidos nestes sistemas e as despesas com mão-de-obra. Este mérito expõe a importância da busca por soluções de automação de baixo custo, que possam viabilizar opções que anteriormente seriam descartadas e impulsionar o uso das estações de tratamento compactas. Sendo assim, ao se analisar os custos associados aos elementos descritos no Tópico 2.3, chega-se ao seguinte panorama:

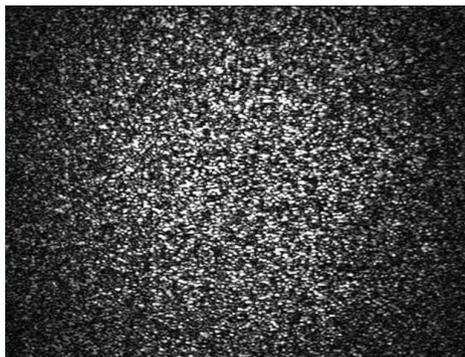
- Sistemas Supervisórios – São aplicativos que podem ser desenvolvidos a partir de uma grande quantidade de plataformas disponíveis no mercado, sendo que existem várias opções de baixo custo e até mesmo gratuitas;
- Controladores Lógico-Programáveis – Existem vários modelos, variando entre os considerados de grande, médio e pequeno porte. Os primeiros, por possuírem capacidade para controlar uma grande quantidade atuadores, alto poder de processamento e grau de confiabilidade, podem custar dezenas de milhares de dólares, ao passo que os últimos, por serem restritos a processos menores e menos críticos, podem ser adquiridos por valores inferiores a 500 dólares. Dessa forma, não chegam a ser um empecilho para a automação de estações de tratamento compactas, inclusive porque menores capacidades de processamento podem ser compensadas por algoritmos de controle mais eficientes, como o proposto em Braz e Viana (2015);
- Atuadores – São elementos que, de forma geral, devem estar presentes em qualquer processo, seja qual for seu grau de automação. Observa-se que válvulas manuais possuem custo inferior ao das válvulas comandadas eletricamente e que, caso haja a necessidade de se controlar a velocidade de rotação dos motores elétricos, o uso de dispositivos como inversores de frequência é necessário. No entanto, como os processos compactos de tratamento de água ou esgoto não necessitam de uma grande quantidade desses elementos, os custos a eles relacionados tendem a não se tornar um fator impeditivo para a adoção de soluções automatizadas;
- Medidores – De forma similar ao caso dos CLPs, estes elementos possuem custos que podem variar de acordo com algumas de suas características, neste caso: precisão, faixa de medição, grau de proteção, entre outras. Além disso, de forma geral, nota-se que o grau de especialização do medidor impacta significativamente em seu custo financeiro: ao passo que

medidores de temperatura, pressão, nível e vazão, comuns em diversos segmentos industriais, possuem custos menores; medidores mais específicos apresentam um custo maior, como é o caso dos utilizados em sistemas de controle de turbidez, pH, oxigenação e cloração, justificando a busca por tecnologias alternativas, como a metodologia óptica apresentada no tópico a seguir.

2.5 Speckle Laser Dinâmico

De acordo com o princípio de Huygens–Fresnel, quando um feixe de luz atinge uma superfície, cada ponto desta atua como um emissor de ondas secundárias (HECHT, 1998, p. 434). Se o feixe for coerente e a superfície possuir rugosidades da ordem do seu comprimento de onda, a superposição das ondas secundárias originadas em pontos distintos da superfície forma um padrão de interferência cujas intensidades variam ao acaso (SILVA; MURAMATSU, 2007). Os pontos de interferência construtiva e destrutiva dão origem a pontos claros e escuros, respectivamente. Cada ponto claro é denominado “*speckle*” e o conjunto deles, como o que aparece na Figura 1.8, é conhecido como “*speckle pattern*”.

Figura 1.8 – Conjunto de grãos luminosos, descrito em português como “padrão de *speckle*”.



Fonte: Rabal e Braga (2008, p. 2).

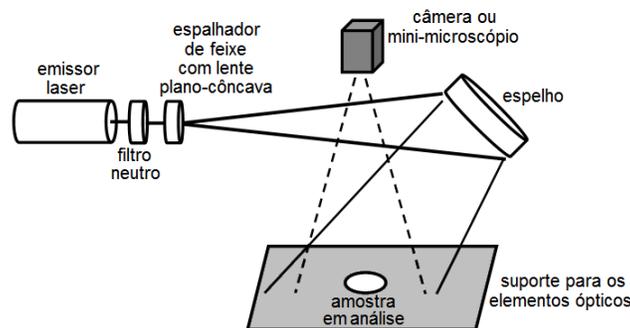
Objetos iluminados com *laser* geralmente se apresentam cobertos por essa estrutura granular pois, em escala microscópica, grande parte das superfícies se mostram extremamente irregulares. Ao se observar este fenômeno, percebe-se que o padrão de *speckle* é um portador de informações sobre o objeto iluminado, apresentando mudanças de luminosidade correspondentes ao nível de atividade que ocorre em suas camadas superficiais. Em alguns casos, o efeito visual é um fervilhamento, semelhante as imagens de um antigo televisor fora de sintonia. Este fenômeno, conhecido como “*speckle* dinâmico”, pode ser analisado por meio de diferentes ferramentas matemáticas e estatísticas, que podem fornecer informações numéricas ou visuais sobre a intensidade do movimento. Entre a grande quantidade de aplicações dessa técnica em material inorgânico, pode-se mencionar a análise de secagem de pinturas (BALAMURUGAN; RAJARAJAN, 2017) e adesivos (ANSARI; NIRALA, 2015) e o monitoramento de revestimentos (AMALVY et al., 2001), espumas (BANDYOPADHYAY et al., 2005) e corrosões (MURAMATSU; GUEDES; GAGGIOLI, 1994).

Quando o material iluminado é de origem orgânica, vários autores usam o termo “*biospeckle*” para se referir ao fenômeno de fervilhamento óptico originado por sua atividade biológica. Ao que parece, a primeira utilização desse termo foi em Asakura (1988), quando o autor apresentou uma metodologia para análise de fluxo sanguíneo, na mesma linha do que havia sido proposto em Briers (1975) e Fujii et al. (1985). A partir dos primeiros trabalhos publicados na década de 1970, a espiral ascendente que conecta pesquisa e desenvolvimento tecnológico à novas aplicações e demandas passou a tomar forma nesta área. Surgiram novos trabalhos relacionados à medicina (BRIERS; WEBSTER, 1996) e diversas aplicações voltadas à agropecuária, envolvendo estimativas de atividade biológica em sementes (BRAGA JÚNIOR et al., 2001; BRAGA; FABBRO et al., 2003), sêmen animal (CARVALHO et al., 2009), frutos (PAJUELO et al., 2003; RABELO; BRAGA JÚNIOR; FABBRO, 2005) e raízes (BRAGA;

DUPUY et al., 2009). Trabalhos recentes como análises de outros tecidos vegetais (KURENDA; ADAMIAK; ZDUNEK, 2012) e o monitoramento de bactérias em meio controlado (MURIALDO et al., 2009) e de câncer animal (BRAGA; CARDOSO et al., 2012) exemplificam a grande lista de aplicações.

A Figura 1.9 apresenta o diagrama de uma configuração experimental bastante utilizada em diversas aplicações do *speckle* dinâmico. Neste caso, o feixe de luz coerente produzido pelo emissor atinge a amostra de material que se deseja analisar após passar por um filtro neutro, uma lente espalhadora e ser refletido por um espelho. Portanto, espera-se que um padrão de *speckle* seja formado sobre a amostra que está sendo iluminada. Este padrão, que a princípio seria estático, tende a ser tornar dinâmico, evidenciando as mudanças que ocorrem na superfície da amostra em consequência de sua atividade intrínseca. Desta forma, pode-se dizer que as alterações no padrão de *speckle* amplificam as alterações que ocorrem nas camadas superficiais da amostra.

Figura 1.9 – Diagrama esquemático de uma possível configuração experimental.



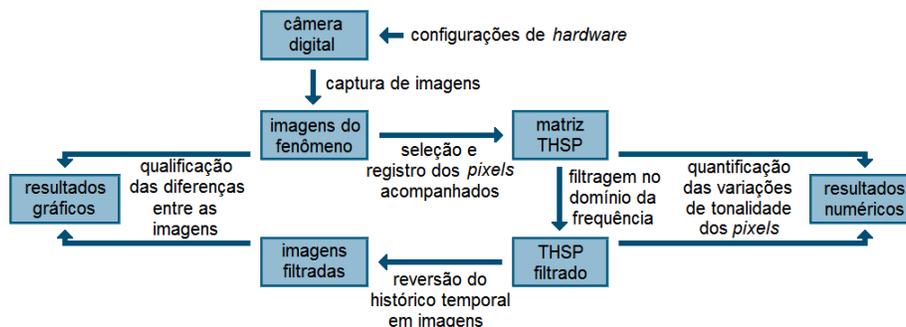
Fonte: Braga e González-Peña (2016).

Por volta de 1990, a análise do *speckle* dinâmico ganhou nova perspectiva com o avanço das técnicas digitais de captura de imagem (GODINHO, 2012). A substituição das câmeras fotográficas comuns por novas tecnologias de fotografia digital permitiu que a movimentação de um padrão de *speckle* seja registrada por uma sequência de fotografias, ou mesmo, em formato de vídeo. Uma câmera

CCD (do termo em inglês, *Charge Coupled Device*), por exemplo, pode ser utilizada para salvar 500 imagens em um microcomputador com intervalo de 50 milissegundos entre elas.

Por sua vez, as etapas que constituem as principais técnicas de análise dessas imagens podem ser observadas, de forma resumida, no diagrama mostrado na Figura 1.10. Os retângulos, com exceção da câmera digital, representam arquivos em formato digital, produzidos pelas funções computacionais representadas pelas indicações de fluxo entre eles. Descrições sucintas sobre cada uma dessas funções são dadas a seguir.

Figura 1.10 – Diagrama que resume as principais técnicas de processamento de imagem relacionadas ao *speckle* dinâmico, no qual os retângulos representam a câmera e os arquivos digitais produzidos pelas funções computacionais representadas pelas setas.



Fonte: Do autor (2017).

- Configurações de *hardware* da câmera – Em geral, a primeira tarefa a ser realizada é a configuração dos circuitos eletrônicos da câmera, pelos quais recursos como a compensação automática de luz e o cálculo do tempo de exposição podem ser desativados com o objetivo de eliminar a influência de tais funcionalidades no posterior processo de quantificação de intensidade luminosa. Em alguns modelos, isto pode ser feito por botões embutidos nos próprios equipamentos ou através do *software* que

os acompanham. De forma alternativa, as funções “*imaqhwinfo*” e “*getselectedsource*”, pertencentes à biblioteca “*Image Acquisition Toolbox*” da plataforma MATLAB[®], podem ser utilizadas com este propósito, conforme metodologia descrita em Viana e Braga (2015).

- Captura de imagens – As imagens a serem processadas por meio das técnicas descritas a seguir devem ser capturadas em tons de cinza e armazenadas individualmente em arquivos digitais. Desta forma, cada um desses arquivos pode ser descrito como a matriz de dimensões $n \times m$ dada por:

$$I = \begin{bmatrix} i(1,1) & i(1,2) & \cdots & i(1,m) \\ i(2,1) & i(2,2) & \cdots & i(2,m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i(n,1) & i(n,2) & \cdots & i(n,m) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

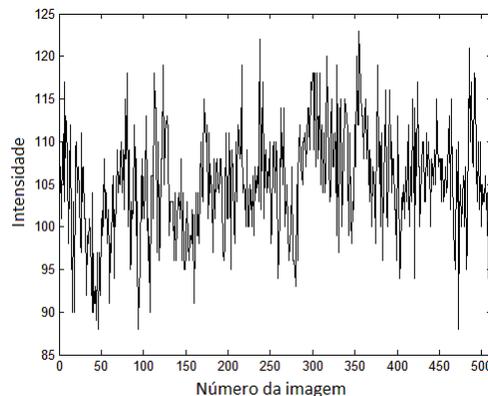
em que cada elemento i representa a tonalidade de cinza de um *pixel*, que varia entre 0 (preto) e 255 (branco) (GONZALEZ; WOODS, 2008). Desta forma, para cada padrão de *speckle* a ser monitorado, os principais parâmetros a serem definidos nesta etapa são: quantidade e dimensões das imagens a serem capturadas, intervalo de captura, diretório e nome dos arquivos em que as imagens serão armazenadas.

- Qualificação das diferenças entre as imagens – O objetivo é produzir informações visuais para interpretação humana (resultados gráficos) a partir das variações de um padrão de *speckle* registradas por uma coleção de imagens obtida na etapa anterior. De acordo com a quantidade de aplicações em trabalhos científicos, merecem destaque o método de Fujii (FUJII et al., 1985), o método das diferenças generalizadas (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999) e o método do desvio padrão (NOTHDURFT; YAO, 2005; CARDOSO; BRAGA; RABAL, 2012). Apesar da importância dessas

técnicas, elas não são descritas aqui, pois não foram utilizadas neste trabalho.

- Seleção e registro dos *pixels* acompanhados – Nesta etapa, o objetivo é a construção da matriz THSP (do termo em inglês, *Time History of the Speckle Pattern*) (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999). Para tal, o primeiro passo é selecionar, na primeira imagem de uma coleção, quais *pixels* serão acompanhados ao longo do tempo. Algumas possibilidades de seleção são: todos os *pixels* da Matriz 1.1, todos os *pixels* de uma linha dessa matriz, todos os *pixels* de uma coluna ou aleatoriamente, em quantidade desejada. Em seguida, os valores correspondentes ao nível de cinza dos *pixels* selecionados na primeira imagem da coleção são copiados para a primeira coluna da matriz THSP. Analogamente, a mesma operação é repetida para as demais imagens da coleção, levando a matriz THSP a possuir as dimensões $p \times q$, em que p é o número de *pixels* selecionados na primeira imagem e q a quantidade de imagens da coleção. Ou seja, cada linha dessa matriz contém as variações de intensidade de um determinado *pixel* ao longo do tempo, conforme exemplo mostrado na Figura 1.11.

Figura 1.11 – Variações de intensidade de um determinado *pixel* registradas em uma matriz THSP construída a partir de uma coleção com 512 imagens.



Fonte: Do autor (2017).

- Quantificação das variações de tonalidade dos *pixels* – Os procedimentos conhecidos como Momento de Inércia (MI) (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999) e AVD (do termo em inglês, *Absolute Values of Differences*) (BRAGA; NOBRE et al., 2011) são utilizados para desempenhar esta tarefa em uma grande quantidade de trabalhos. Ambos se baseiam em uma etapa preliminar comum, na qual a chamada Matriz de Co-Ocorrência (MCO) é construída. Esta matriz tem dimensões fixas (256×256) e registra todas as diferenças de tonalidade contidas em uma matriz THSP. Por exemplo, se um sinal semelhante ao mostrado na Figura 1.11 denota alterações de 0 para 39 em três momentos distintos, o elemento $MCO(1, 40)$ armazenará o valor 3. De forma similar, se a tonalidade se mantiver constante em 255 em oito situações distintas, o elemento $MCO(256, 256)$ armazenará o valor 8. Matematicamente, esta construção pode ser descrita pela expressão:

$$MCO(THSP(x, y) + 1, THSP(x, y + 1) + 1) = \\ MCO(THSP(x, y) + 1, THSP(x, y + 1) + 1) + 1 \quad (1.2)$$

em que $x = 1, \dots, p$ e $y = 1, \dots, q - 1$ são os índices que, combinados, permitem que todas as diferenças de tonalidade contidas na matriz THSP sejam contabilizadas. Posteriormente, no caso do algoritmo MI, o valor escalar que resume a atividade registrada nas imagens de um padrão de *speckle* é calculado da seguinte forma:

$$MI = \sum_{r=1}^{256} \sum_{s=1}^{256} \frac{MCO(r, s) \cdot (r - s)^2}{p \cdot (q - 1)} \quad (1.3)$$

e, no caso do algoritmo AVD:

$$AVD = \sum_{r=1}^{256} \sum_{s=1}^{256} \frac{MCO(r, s) \cdot |r - s|}{p \cdot (q - 1)} \quad (1.4)$$

- Filtragem no domínio da frequência – Alguns materiais, como os de origem orgânica, estão sujeitos a uma grande quantidade de fatores que podem influenciar na movimentação de sua superfície. Assim, com o objetivo de isolar os fenômenos que contribuem para as mudanças registradas por um padrão de *speckle*, uma alternativa foi introduzida por Sendra et al. (2005), com variações apresentadas por Passoni et al. (2005) e Braga Jr. et al. (2007). Desta forma, o domínio da frequência passou a ser uma importante ferramenta neste tipo de análise, sendo que a marcação de distintos tipos de câncer pode ser um bom exemplo da sua aplicação (BRAGA; CARDOSO et al., 2012). Basicamente, estes métodos consistem em filtrar os sinais contidos em uma matriz THSP, dando origem a outras matrizes de mesmas dimensões que, no entanto, serão diferentes da original pois conterão apenas as mudanças que ocorreram no *speckle* em determinadas faixas de frequência. Conforme indicado no diagrama da Figura 1.10, qualquer uma dessas novas matrizes pode ser submetida aos processos de quantificação descritos no item anterior.
- Reversão de um histórico temporal filtrado em coleção de imagens – Este processo permite que uma matriz THSP que tenha passado pelo processo de filtragem no domínio da frequência seja revertida em uma coleção de imagens, sendo que o objetivo é permitir que coleções livres da influência de determinadas frequências possam ser submetidas às técnicas de análises gráficas mencionadas anteriormente. Para tal, é necessário que, no processo de construção da matriz THSP original, todos os *pixels* das imagens de uma coleção tenham sido selecionados para acompanhamento e que as dimensões dessas imagens estejam disponíveis.

BIBLIOGRAFIA

AGUIRRE, L. A. **Enciclopédia de automática: controle e automação**. 1. ed. [S.l.]: Blucher, 2007. v. 2.

AMALVY, J. I. et al. Application of dynamic speckle interferometry to the drying of coatings. **Progress in Organic Coatings**, v. 42, p. 89–99, 2001.

AMARAL, L.A.; NADER, A.F. et al. Água de consumo humano como fator de risco à saúde em propriedades rurais. **Revista de Saúde Pública**, v. 37, p. 510–514, 2003.

AMARAL, L.A.; ROSSI, O.D.J. et al. Água utilizada em propriedades rurais para o consumo humano e na produção de leite como veículo de bactérias do gênero *Aeromona*. **Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias**, v. 101, p. 103–107, 2006.

ANDERSON, J. The environmental benefits of water recycling and reuse. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 3, p. 1–10, 2003.

ANSARI, M. Z.; NIRALA, A. K. Assessment of Fevicol (adhesive) drying process through dynamic speckle techniques. **AIMS Bioeng**, v. 2, p. 49–59, 2015.

ARIZAGA, R.; TRIVI, M.; RABAL, H. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. **Optics Laser Technology**, v. 31, p. 163–169, 1999.

ASAKURA, T. Dynamic properties of bio-speckles and their application to blood flow measurements. **Anritsu News**, v. 8, p. 4–9, 1988.

BALAMURUGAN, R.; RAJARAJAN, G. Study of drying process of paint by dynamic speckle with B/D pixel counting technique. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 98, p. 62–68, 2017.

BANDYOPADHYAY, R. et al. Speckle-visibility spectroscopy: A tool to study time-varying dynamics. **Review of Scientific Instruments**, v. 76, p. 093110, 2005.

BARLIAN, A. A. et al. Review: Semiconductor Piezoresistance for Microsystems. **Proceedings of the IEEE**, v. 97, p. 513–552, 2009.

BELISÁRIO, M. et al. O emprego de resíduos naturais no tratamento de efluentes contaminados com fármacos poluentes. **Revista Científica Internacional**, v. 10, p. 1–13, 2009.

BETANCOURT, W. Q.; ROSE, J. B. Drinking water treatment processes for removal of *Cryptosporidium* and *Giardia*. **Veterinary Parasitology**, v. 126, p. 219–234, 2004.

BRAGA JR., R.A. et al. Biological feature isolation by wavelets in biospeckle laser images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 58, p. 123–132, 2007. ISSN 0168-1699.

BRAGA JÚNIOR, R.A. et al. Potencial do bio-speckle laser para avaliação da viabilidade de sementes. **Ciência e Agrotecnologia**, 25(3), p. 645–649, 2001.

BRAGA, R.A.; CARDOSO, R.R. et al. Biospeckle numerical values over spectral image maps of activity. **Optics Communications**, v. 285, p. 553–561, 2012. ISSN 0030-4018.

BRAGA, R.A.; DUPUY, L. et al. Live biospeckle laser imaging of root tissues. English. **European Biophysics Journal**, Springer-Verlag, v. 38, p. 679–686, 2009. ISSN 0175-7571.

BRAGA, R.A.; FABBRO, I.M. et al. Assessment of Seed Viability by Laser Speckle Techniques. **Biosystems Engineering**, v. 86, p. 287–294, 2003. ISSN 1537-5110.

BRAGA, R.A.; GONZÁLEZ-PEÑA, R.J. Accuracy in dynamic laser speckle: optimum size of speckles for temporal and frequency analyses. **Optical Engineering**, v. 55, p. 121702, 2016.

BRAGA, R.A.; NOBRE, C.M.B. et al. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences. **Optics Communications**, v. 284, p. 646–650, 2011. ISSN 0030-4018.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005**. Accessed: June 28, 2016. Conselho Nacional de Meio Ambiente. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>.

BRAZ, P. H. A.; VIANA, D. C. Implementação de controladores fuzzy em CLPs de pequeno porte. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI). [S.l.: s.n.], 2015.

BRIERS, J. D.; WEBSTER, S. Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow. **Journal of Biomedical Optics**, v. 1, p. 174–179, 1996.

BRIERS, J.D. Wavelength dependence of intensity fluctuations in laser speckle patterns from biological specimens. **Optics Communications**, v. 13, p. 324–326, 1975.

BURLINGAME, G. A.; PICKEL, M. J.; ROMAN, J. T. Practical applications of turbidity monitoring. **American Water Works Association. Journal**, v. 90, p. 57, 1998.

CAMPOS, A. et al. Caracterização microbiológica da água do meio rural da região sudoeste do Paraná. **Geoambiente On-Line**, v. 11, p. 206–220, 2008.

CARDOSO, K.C.; BERGAMASCO, R. et al. Otimização dos tempos de mistura e decantação no processo de coagulação/floculação da água bruta por meio da Moringa oleifera Lam. **Acta Scientiarum Technology**, v. 30, p. 193–198, 2008.

CARDOSO, R.R.; BRAGA, R.A.; RABAL, H.J. Alternative Protocols on Dynamic Speckle Laser Analysis. In: SOCIETY of Photo–Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. [S.l.: s.n.], 2012. v. 8413.

CARVALHO, P.H.A. et al. Motility parameters assessment of bovine frozen semen by biospeckle laser (BSL) system. **Biosystems Engineering**, v. 102, p. 31–35, 2009. ISSN 1537-5110.

CRISAFULLY, R. et al. Removal of some polycyclic aromatic hydrocarbons from petrochemical wastewater using low-cost adsorbents of natural origin. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 4515–4519, 2008.

DALSASSO, R.L.; SENS, M.L. Filtração direta com pré-floculação e coagulação com sulfato de alumínio e hidroxiclreto de alumínio: Estudo com água de manancial eutrofizado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, p. 241–249, 2006.

DI BERNARDO, L.; BOTARI, A.; SABOGAL, L.P.P. Uso de modelação matemática para projeto de câmaras mecanizadas de floculação em série em estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, p. 82–90, 2005.

DIEU, B. Application of the SCADA system in wastewater treatment plants. **ISA Transactions**, v. 40, p. 267–281, 2001.

EHGARTNER, J. et al. Low cost referenced luminescent imaging of oxygen and pH with a 2-CCD colour near infrared camera. **Analyst**, v. 139, p. 4924–4933, 2014.

FAWELL, J. et al. **Fluoride in Drinking-water**. [S.l.]: IWA Publishing, 2006. ISBN 9789241563192.

FORMISANO, F. et al. Inactivation of Escherichia coli and Enterococci in urban wastewater by sunlight/PAA and sunlight/H₂O₂ processes. **Process Safety and Environmental Protection**, 104, Part A, p. 178–184, 2016.

FRANCESCHI, M. et al. Optimisation of the coagulation-flocculation process of raw water by optimal design method. **Water Research**, v. 36, p. 3561–3572, 2002.

FRANCHI, C.M.; DE CAMARGO, V.L.A. **Controladores Lógico Programáveis – Sistemas Discretos**. 2. ed. [S.l.]: Érica, 2009.

FRANCO, C. S. **Sistema Alternativo de Tratamento de Água em Escala Descentralizada**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras.

FUJII, H. et al. Blood flow observed by time-varying laser speckle. **Opt. Lett.**, OSA, v. 10, p. 104–106, 1985.

GODINHO, R.P. **Alternativas para Implementação da Análise do Speckle Laser em Tempo Real**. 2012. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras.

GOMES, J.M.C. **Contribuição para o estudo de sistemas de tratamento de água a adoptar em zonas economicamente desfavorecidas**. 2011. Diss. (Mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente.

GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. **Digital image processing**. [S.l.]: Pearson/Prentice Hall, 2008. ISBN 9780131687288.

GOPAL, M. **Digital Control and State Variable Methods**. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2008. ISBN 9780070668805.

HAMILTON, R. et al. Control issues and challenges in wastewater treatment plants. **IEEE Control Systems**, v. 26, p. 63–69, 2006.

HECHT, E. **Optics**. [S.l.]: Addison–Wesley, 1998. ISBN 9780201304251.

HELBEL, A. F.; NUNES, M. L. A.; MARCHETTO, M. Água subterrânea: estudo de caso em Ji-Paraná, RO. **Águas Subterrâneas**, 2008.

HELLER, L.; COLOSIMO, A.E.; ANTUNES, C.M.F. Environmental sanitation conditions and health: impact: a case-control study. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, v. 36, p. 41–50, 2003.

HELLER, L.; PÁDUA, V.L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2010. p. 859.

HSU, L. et al. Development of a Low-Cost Hemin-Based Dissolved Oxygen Sensor With Anti-Biofouling Coating for Water Monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 14, p. 3400–3407, 2014.

HUA, G.; YEATS, S. Control of trihalomethanes in wastewater treatment. **Fla. Water Resour. Journal**, v. 4, p. 6–12, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Ed.). **Indicadores de desenvolvimento sustentável Brasil 2015**. Rio de Janeiro: República Federativa do Brasil, 2015.

JORSARAEI, A.; GOUGOL, M.; VAN LIER, J. B. A cost effective method for decentralized sewage treatment. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 92, p. 815–821, 2014.

JULIO, M. et al. Evolução histórica do sistema de abastecimento de água do município de Ponta Grossa–PR. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 2, p. 1–14, 2010.

KURENDA, A.; ADAMIAK, A.; ZDUNEK, A. Temperature effect on apple biospeckle activity evaluated with different indices. **Postharvest Biology and Technology**, v. 67, p. 118–123, 2012. ISSN 0925-5214.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. [S.l.]: Átomo, 2010. p. 496. ISBN 9788576701651.

LÖFFLER, D. et al. Environmental fate of pharmaceuticals in water/sediment systems. **Environmental Science Technology**, v. 39, p. 5209–5218, 2005.

MARTIRANI, L. A.; PERES, I. K. Water crisis in São Paulo: news coverage, public perception and the right to information. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, p. 1–20, 2016.

MATILAINEN, A.; VEPSÄLÄINEN, M.; SILLANPÄÄ, M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. In: **ADVANCES in Colloid and Interface Science**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 9.

MOBUS, G.E.; KALTON, M.C. **Principles of Systems Science**. [S.l.]: Springer New York, 2014. ISBN 9781493919208.

MORAES, C. C. de; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de automação industrial**. [S.l.]: LTC, 2010. ISBN 9788521615323.

MURAMATSU, M.; GUEDES, G. H.; GAGGIOLI, N. G. Speckle correlation used to study the oxidation process in real time. **Optics & Laser Technology**, v. 26, p. 167–168, 1994.

MURIALDO, S. E. et al. Analysis of bacterial chemotactic response using dynamic laser speckle. **Journal of Biomedical Optics**, v. 14, p. 064015–064015, 2009.

NAM, S. W. et al. Streaming current titration for coagulation of high turbidity water. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 419, p. 133–139, 2013.

NEIS, U.; TIEHM, A. Particle size analysis in primary and secondary waste water effluents. **Water Science and Technology**, v. 36, p. 151–158, 1997.

NOTHDURFT, R.; YAO, G. Imaging obscured subsurface inhomogeneity using laser speckle. **Optical Express**, v. 13, 2005.

OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 5. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2010. ISBN 9780136156734.

PAJUELO, M. et al. Bio-speckle assessment of bruising in fruits. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 40, p. 13–24, 2003.

PASSINO, K.M.; YURKOVICH, S. **Fuzzy Control**. 1st. [S.l.]: Addison-Wesley, 1997.

PASSONI, I. et al. Dynamic speckle processing using wavelets based entropy. **Optics Communications**, v. 246, p. 219–228, 2005. ISSN 0030-4018.

PETRUZELLA, F. D. **Controladores Lógicos Programáveis**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. ISBN 9788580552836.

RABAL, H. J.; BRAGA, R. A. **Dynamic Laser Speckle and Applications**. [S.l.]: CRC Press, 2008. ISBN 9781420060164.

RABELO, G.F.; BRAGA JÚNIOR, R.A.; FABBRO, I.M.D. Laser speckle techniques in quality evaluation of orange fruits. en. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, scielo, v. 9, p. 570–575, 2005. ISSN 1415-4366.

REBOUÇAS, A.C. Água e desenvolvimento rural. **Estudos Avançados**, v. 15, p. 327–344, 2000.

REHG, J.A.; SARTORI, G.J. **Programmable logic controllers**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.

REYES, C. A. P. **Coevolutionary Fuzzy Modeling**. 1st. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

ROCHA, C.M.B.M. et al. Avaliação da qualidade da água e percepção higiênico-sanitária na área rural de Lavras, Minas Gerais, Brasil, 1999–2000. **Caderno de Saúde Pública**, v. 22, p. 1967–1978, 2006.

ROSSINI, M.; GARRIDO, J. G.; GALLUZZO, M. Optimization of the coagulation-flocculation treatment: influence of rapid mix parameters. **Water Research**, v. 33, p. 1817–1826, 1999.

SALGE, P. et al. Soluções de saneamento para comunidades rurais costeiras: Um modelo tecnicamente apropriado e com participação social. In: VI Encontro de Extensão e Cultura da UFPR: entendendo a extensão. Curitiba: [s.n.], 2007.

SANTOS, E.P.C.C. et al. Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, p. 361–370, 2007.

SANTOS, M. M. D. **Supervisão de sistemas: funcionalidades e aplicações**. [S.l.]: Érica, 2014. ISBN 9788536508627.

SENDRA, G.H. et al. Decomposition of biospeckle images in temporary spectral bands. **Opt. Lett.**, OSA, v. 30, p. 1641–1643, 2005.

SILVA, C. W. **Sensors and Actuators: Engineering System Instrumentation**. [S.l.]: CRC Press, 2015. ISBN 9781466506824.

SILVA, E.; MURAMATSU, M. O fenômeno do speckle como introdução à metrologia óptica no laboratório didático. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, p. 283–286, 2007.

SINGH, S.; ELUMALAI, S. P.; PAL, A. K. Rain pH estimation based on the particulate matter pollutants and wet deposition study. **Science of The Total Environment**, v. 563–564, p. 293–301, 2016.

SOVA, R.; WILSON, R.; CRISLER, S. Automated Primary and Secondary Solids Control Using Solids Density Meters. **Proceedings of the Water Environment Federation**, v. 2008, p. 3707–3720, 2008.

TARLEY, C.R.T.; ARRUDA, M.A.Z. Adsorventes naturais: Potencialidades e aplicações da esponja natural (*Luffa cylindrica*) na remoção de chumbo em efluentes de laboratório. **Revista Analytica**, v. 4, p. 25–31, 2003.

TEIXEIRA, A. R. et al. Comparação do tratamento de água com baixa turbidez por filtração direta ascendente e descendente. In: CONGRESSO Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, Campo Grande, 18–23 set. 2005. [S.l.: s.n.], 2005.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. B. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 8. ed. [S.l.]: Érica, 2011.

TIWARI, M. K.; ADAMOWSKI, J. Urban water demand forecasting and uncertainty assessment using ensemble wavelet-bootstrap-neural network models. **Water Resources Research**, v. 49, p. 6486–6507, 2013.

VERAS, L. R. V.; DI BERNARDO, L. Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas – FIME. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, p. 109–116, 2008.

VERAS, L.R.V.; DI BERNARDO, L. Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas – FIME. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, p. 109–116, 2008.

VIANA, D. C.; BRAGA, R. A. Turbidímetro de baixo custo baseado em processamento de imagens. In: JUBILEU de Ouro da SBEA. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 9788564681101.

VIEIRA, P. et al. Avaliação de desempenho de estações de tratamento de água. In: ÁGUAS & Resíduos. [S.l.: s.n.], 2009. p. 4–17.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. [S.l.]: Editora UFMG, 2014. v. 1.

YADAV, D.S.; SINGH, A.K. **Microcontroller: Features and Applications**. [S.l.]: New Age International, 2004. ISBN 9788122415698.

ZANAROTTO, R. et al. Avaliação da eficiência da clorofila e da luz natural no processo de degradação fotoquímica do corante tóxico congo red. **Revista Capixaba de Ciência e Tecnologia**, v. 4, p. 1–8, 2007.

**CAPÍTULO 2 –
DESENVOLVIMENTO DE UM
TURBIDÍMETRO DE BAIXO
CUSTO POR MEIO DE
PROCESSAMENTO DE
IMAGENS¹**

¹ Este capítulo é uma versão atualizada do artigo elaborado por Viana e Braga (2015) durante o desenvolvimento desta Tese, incluindo as alterações sugeridas pelos membros das bancas que a avaliaram nas etapas de qualificação e defesa.

RESUMO

Entre os diversos indicadores envolvidos na análise de qualidade e tratamento de água, a turbidez é considerada um “parâmetro chave”. Assim, a redução do custo financeiro associado à medição deste parâmetro se faz relevante, principalmente para estações de tratamento compactas que, por sua vez, são importantes para a universalização do acesso à água potável no meio rural. O medidor proposto neste trabalho constitui-se, basicamente, de um emissor *laser* e de uma *webcam*. O *laser* incide na amostra de líquido a ser avaliada e a quantidade de luz que a atravessa é captada pela câmera. Por meio de um *software* relativamente simples, instalado no microcomputador em que a *webcam* está conectada, as imagens captadas podem ser processadas. Isso isenta o medidor de possuir circuitos eletrônicos dedicados a esse tipo de processamento e pode reduzir significativamente seu custo de produção. No experimento realizado, seis repetições de oito tratamentos foram analisadas e todas as médias diferiram estatisticamente entre si ao nível de 1 %, de acordo com o teste de Tukey. Além disso, utilizando-se um turbidímetro tradicional para avaliar as mesmas amostras, obteve-se uma equação que permite converter os valores produzidos pelo processamento de imagens em valores do sistema internacional de medidas.

1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento essencial à vida, porém ao servir de veículo para agentes biológicos e químicos, pode trazer riscos à saúde de seres humanos e animais. Por isso, o homem deve estar atento aos fatores que podem interferir negativamente na qualidade da água que utiliza (HELLER; COLOSIMO; ANTUNES, 2003). Por ser de fundamental importância para a saúde e higiene, o acesso à água tratada é um fator que caracteriza a qualidade de vida de uma população, sendo também considerado um indicador universal de desenvolvimento sustentável (SALGE et al., 2007). Apesar desses fatos serem amplamente conhecidos e divulgados, a água potável está cada vez mais escassa, em decorrência do aumento da população mundial e da intervenção ativa do homem nos ambientes urbano e rural (AMARAL et al., 2006).

Dos diversos indicadores envolvidos na análise de qualidade e tratamento de água, a turbidez é considerada um “parâmetro-chave” pois, como reflete a concentração de sólidos em suspensão, também pode ser usada como indicador de probabilidade para a presença de cistos e oocistos de protozoários (LIBÂNIO, 2010, p. 32). Tradicionalmente, os medidores eletrônicos de turbidez baseiam-se em um sensor que converte a intensidade luminosa que atravessa a amostra em análise em um sinal elétrico (de forma alternativa, pode-se avaliar a intensidade luminosa que é retida pela amostra) (HART; JOHNSON; LETTERMAN, 1992). Em geral, esse tipo de sensor não é oneroso financeiramente, mas a eletrônica necessária para processar o sinal elétrico fornecido por ele e apresentar os resultados em um mostrador de cristal líquido, bem como permitir que o usuário opere o aparelho por meio de botões, encarece o medidor.

Sendo assim, esforços para obtenção de medidores mais eficientes podem ser encontrados na literatura². As técnicas que se baseiam em processamento de imagens fornecem alguns exemplos nos quais, em geral, são utilizados um emissor de luz e uma *webcam*. O emissor é apontado para a amostra de líquido a ser avaliada, a quantidade de luz que a atravessa é captada pela câmera e as imagens adquiridas são processadas por *software*. Portanto, a *webcam* deve ser conectada a um microcomputador, no qual as imagens são convertidas em valores de turbidez em unidade do sistema internacional. Isso isenta o medidor de possuir circuitos eletrônicos dedicados a esse tipo de processamento e pode reduzir seu custo de produção de forma significativa. Uma vez que os microcomputadores geralmente estão disponíveis em laboratórios e outras instalações em que se realizam análises de líquidos (e não precisam ser dedicados ao medidor, podendo realizar funções paralelas), esta estratégia se mostra uma alternativa interessante.

² Após a publicação deste trabalho, que ocorreu em 2015, novos trabalhos surgiram nesta linha de pesquisa. Alguns exemplos interessantes são: Karnawat e Patil (2016) e Chai, Ng e Chua (2017).

Em um trabalho elaborado por Kontturi et al. (2009), um método para medição de turbidez a partir de processamento de imagens foi investigado, no qual os autores aplicam a técnica do Speckle Laser Dinâmico³ para quantificar a movimentação das partículas presentes no líquido que se deseja analisar. Desse modo, o referido método é sensível à concentração de partículas e robusto em relação à tonalidade das mesmas, o que muitas vezes representa uma vantagem. Os testes de validação ocorreram em uma faixa entre 0 e 800 NTU e o resultados se mostraram confiáveis. No entanto, para que a velocidade das partículas não influencie a medição, necessita-se de uma bomba peristáltica para que o líquido circule dentro do medidor de forma padronizada, aumentando a complexidade deste último. Além disso, o método é bastante sensível à vibração, o que pode inviabilizar sua aplicação prática em determinados ambientes.

Em outro trabalho, Jamale e Pardeshi (2014) sugeriram um método para medição de turbidez que se baseia em uma câmera, um microcomputador e um *software* que processa as imagens captadas. Antes de realizar as medições, os referidos autores propõem que um banco de dados seja formado, da seguinte forma: para diferentes líquidos de turbidez conhecida, captura-se algumas imagens no padrão RGB (do inglês, *red, green, blue*). Entre as imagens associadas a um líquido, os menores e os maiores valores de cada um dos três componentes (RGB) são armazenados. Ao se concluir esta etapa, os intervalos de variação dos componentes RGB de cada líquido utilizado como referência estão registrados. Posteriormente, quando se deseja determinar a turbidez de uma amostra, os valores de seus componentes RGB são apurados e um líquido de turbidez conhecida, cujos intervalos comportem esses valores, é procurado no banco de dados. Portanto, o referido método apenas identifica a turbidez de uma amostra se um líquido de tonalidade muito parecida estiver catalogado em seu banco de dados.

³ Os fundamentos desta técnica podem ser encontrados em Rabal e Braga (2008).

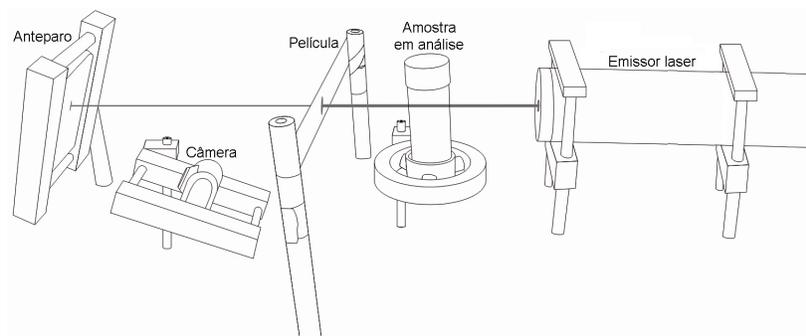
Por sua vez, o método investigado no presente trabalho tem como principal hipótese a viabilidade de utilização de imagens em tons de cinza, em detrimento do sistema RGB, possibilitando que os valores produzidos pelo processamento de imagens sejam convertidos em valores do sistema internacional de medidas por meio de uma equação polinomial. Similarmente aos medidores disponíveis no mercado, essa equação pode ser levantada em uma etapa de calibração do instrumento, a partir de poucas amostras cujos respectivos valores de turbidez são conhecidos. Isto dispensa a construção de um banco de dados como o realizado em Jamale e Pardeshi (2014), tornando a utilização do medidor mais prática.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é verificar a possibilidade de se determinar a turbidez em amostras de água com diferentes concentrações de produto turvador por meio do uso de componentes alternativos em relação à tecnologia dos turbidímetros tradicionais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento da técnica proposta utilizou um modelo experimental composto por um emissor laser, um recipiente no qual a amostra a ser analisada é depositada e iluminada, um anteparo para projeção da luz emitida e um sistema de registro de imagens (*webcam*). Além disso, para atenuar a quantidade de luz recebida pela câmera, um filtro neutro na forma de película foi instalado entre o suporte da amostra e o anteparo. A Figura 2.1 ilustra o arranjo dos elementos mencionados. Para evitar interferências de outras fontes luminosas, o aparato foi mantido em um compartimento escuro durante todas as sessões experimentais.

Figura 2.1 – Modelo experimental composto por um emissor laser (*HeNe*), cubeta de vidro (15 mL), película semitransparente, *webcam* (modelo Labtec 1200) e anteparo (placa de poliestireno de baixa rugosidade).



Fonte: Do autor (2017).

O princípio de funcionamento baseia-se na seguinte premissa: quanto mais turvo for o líquido em análise, menos intensa é a luz que chega ao anteparo e, conseqüentemente, mais escuras são as imagens deste último. Dessa forma, por meio de um *software*, instalado no microcomputador em que a câmera está conectada, a intensidade dos *pixels* que formam as imagens registradas para uma determinada amostra pôde ser avaliada e, com o uso de uma equação polinomial, convertida em um valor que expressasse a turbidez do líquido em unidade do sistema internacional, no caso, NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

O desempenho da técnica proposta foi avaliado por meio de testes estatísticos e por comparação entre os resultados fornecidos pelo processamento de imagens e os obtidos com o uso de um turbidímetro tradicional (Tecnopon, modelo TB-1000⁴). Em todos os experimentos, as amostras analisadas foram produzidas a partir de dois líquidos, chamados a partir desse ponto de: base clara (água mineral comum) e base escura (250 mL de água mineral com acréscimo de 30 mL de café solúvel em grânulos). Dessa forma, as misturas necessárias puderam ser realizadas por meio de uma pipeta automática.

No primeiro experimento, o teste estatístico baseou-se na seguinte hipótese de nulidade: não existe diferença entre as intensidades luminosas atribuídas às amostras pelo método proposto em função da concentração de produto turvador presente nas mesmas. Para verificar essa hipótese, as amostras do tratamento T_N foram produzidas da seguinte forma: $N \times 100 \mu\text{L}$ de base escura em 15 mL de base clara, para $N = 0, 1, \dots, 7$. Após a análise de variância, realizada com seis repetições de cada tratamento, a capacidade de diferenciação das amostras foi verificada pelo teste de Tukey. Uma vez que há pouco interesse prático em uma relação matemática que forneça a concentração de produto turvador em função da intensidade luminosa, toda amostra avaliada com o método proposto foi, em seguida, analisada com o uso do turbidímetro tradicional. Assim, foi possível encontrar uma equação para converter as intensidades luminosas associadas às amostras em valores expressos em NTU. Novamente, visando minimizar eventuais erros no processo de coleta de dados, o sistema de triplicata foi adotado nas medições realizadas com este último aparelho.

Com a intenção de validar a equação obtida no experimento anterior, um novo experimento foi realizado. Neste, as amostras de validação V_M foram produzidas com o seguinte padrão: $M \times 75 \mu\text{L}$ de base escura em 15 mL de base clara, para $M = 1, 2, \dots, 9$. O procedimento experimental ocorreu da seguinte

⁴ Cuja precisão é de 2 %, em uma faixa de trabalho entre 0 e 1000 NTU.

forma: cada amostra foi analisada pelo método proposto e, em seguida, com o uso do turbidímetro tradicional. Em ambos os casos, o sistema de triplicata foi adotado. Após finalizar as medições, as intensidades luminosas apuradas foram convertidas para valores em NTU por meio da equação obtida no experimento anterior e, por fim, esses valores foram comparados com os fornecidos pelo turbidímetro. O erro absoluto médio foi utilizado como critério de avaliação dos resultados.

As rotinas e funções computacionais utilizadas⁵ foram elaboradas por meio da plataforma MATLAB[®] e a primeira tarefa desenvolvida foi a configuração dos circuitos eletrônicos da câmera, sendo que os recursos⁶ de compensação automática de luz e o cálculo do tempo de exposição foram desativados, eliminando a influência de tais funcionalidades no posterior processo de quantificação de intensidade luminosa. Para isso, as funções “*imaqhwinfo*” e “*getselectedsource*”, da biblioteca “*Image Acquisition Toolbox*” (Versão 4.2), foram utilizadas. Por meio da primeira, é possível listar as características construtivas e os recursos passíveis de configuração de uma câmera. Já com a segunda função, pode-se selecionar o atributo desejado e posteriormente fazer a alteração de seu valor por meio da instrução “*set*”.

Após a configuração da câmera, foi iniciado o processo de captura das imagens. Como o delineamento de blocos casualizados (DBC) foi adotado neste trabalho, uma sub-rotina para solicitar aleatoriamente os tratamentos de cada bloco foi desenvolvida. Para cada amostra, 128 imagens de formato 352×288 foram capturadas em intervalos de 33,3 ms e armazenadas em formato “*bitmap*”. Para aumentar a robustez da coleta de dados, este último procedimento foi realizado em triplicata. Os processos de captura e armazenamento de imagens, respectivamente, basearam-se nas funções “*getdata*” e “*imwrite*”; a primeira pertencente à biblioteca “*Data Acquisition Toolbox*” (Version 3.0) e a última nativa do MATLAB[®].

⁵ Disponíveis em <https://goo.gl/G6EUeB>

⁶ Os recursos a serem desativados podem variar de acordo com o modelo da *webcam*.

Por fim, o processamento digital para obtenção da intensidade luminosa associada a uma determinada amostra foi conduzido a partir do conjunto de 128 imagens que a representa, no qual 50% dos *pixels* da primeira imagem foram selecionados aleatoriamente e acompanhados ao longo das demais 127 imagens do conjunto. Como a tonalidade de cinza de cada *pixel* é representada por um escalar entre 0 (preto) e 255 (branco), a rotina computacional responsável por essa tarefa apenas realizou a média aritmética dos valores associados aos 6.488.064 *pixels* selecionados⁷. Assim, com a adoção do sistema de triplicata, cada amostra foi caracterizada pela intensidade de aproximadamente 20 milhões de *pixels*.

⁷ Cada imagem possui 352×288 *pixels*. Como 50% dos *pixels* de cada conjunto de 128 imagens foram selecionados, chega-se ao valor de 6.488.064 *pixels* considerados em cada análise.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar a eficiência do método proposto, dois experimentos foram conduzidos. No primeiro, o processamento de imagens foi utilizado para analisar, em triplicata, as amostras referentes às seis repetições dos oito tratamentos produzidos, sendo que as respostas obtidas podem ser observadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Intensidades luminosas (tonalidades de cinza entre 0 e 255) obtidas a partir das avaliações em triplicata das 48 amostras do primeiro experimento.

TRATAMENTOS	BLOCOS					
	I	II	III	IV	V	VI
T0	125,86	125,01	126,64	125,71	126,05	126,01
T1	121,78	121,68	121,89	123,57	124,70	122,24
T2	118,50	117,70	116,88	118,38	118,11	118,48
T3	115,38	112,95	114,92	115,02	116,21	114,42
T4	110,53	110,43	109,56	111,65	111,89	110,38
T5	106,32	106,08	106,33	105,93	108,28	107,40
T6	103,05	102,79	103,48	102,08	102,45	103,08
T7	97,44	98,29	97,42	99,25	99,89	98,24

Fonte: Do autor (2017).

Em seguida, após verificar que todas as pressuposições para uma análise de variância foram atendidas, este procedimento estatístico foi aplicado, resultando nos valores apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Análise de variância para a intensidade luminosa atribuída às amostras por meio do processamento de imagens.

FV	GL	SQ	QM	Fc	<i>p</i>
Tratamentos	7	3875,7420	553,6774	1015,939**	0,0000
Blocos	5	11,9160	2,3832	4,373	0,0034
Resíduos	35	19,0747	0,5450		
Totais	47	3906,7326			

FV: fonte de variação; GL: grau de liberdade; SQ: soma dos quadrados;
QM: quadrado médio; **: significativo ($p < 0,01$).

Fonte: Do autor (2017).

Uma vez que os tratamentos foram uma fonte de variação significativa, deve-se rejeitar a hipótese de nulidade declarada na seção anterior ao nível de significância de 1 %, ou seja, pelo menos dois tratamentos apresentaram efeitos diferentes na intensidade luminosa atribuída às amostras por meio da técnica proposta. Sendo assim, como os tratamentos são quantitativos, seria possível obter uma relação matemática para fornecer a concentração de produto turvador em função da intensidade luminosa associada a uma amostra, porém esta relação é de pouco interesse prático. Dessa forma, o teste de Tukey foi aplicado para avaliar a capacidade do método proposto em diferenciar as amostras, sendo que todos os tratamentos diferiram estatisticamente entre si ao nível de 1 %, conforme pode ser observado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Comparação de médias para as intensidades luminosas obtidas com técnica proposta ao se analisar as seis amostras de cada tratamento.

Tratamento	Intensidade luminosa
T0	125,88 a
T1	122,64 b
T2	118,01 c
T3	114,82 d
T4	110,74 e
T5	106,72 f
T6	102,82 g
T7	98,42 h

Valores seguidos pela mesma letra não possuem diferenças significativas ($p < 0,01$) de acordo com o teste de Tukey.

Fonte: Do autor (2017).

Com a intenção de converter dos valores obtidos com o processamento de imagens em valores expressos em unidade internacional, todas as amostras avaliadas com o método proposto foram, em seguida, analisadas com o uso de um turbidímetro tradicional, novamente em triplicata. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.4 e apresentam um coeficiente de variação de 8,70 %, ao passo que o valor encontrado ao se processar os dados obtidos com a técnica

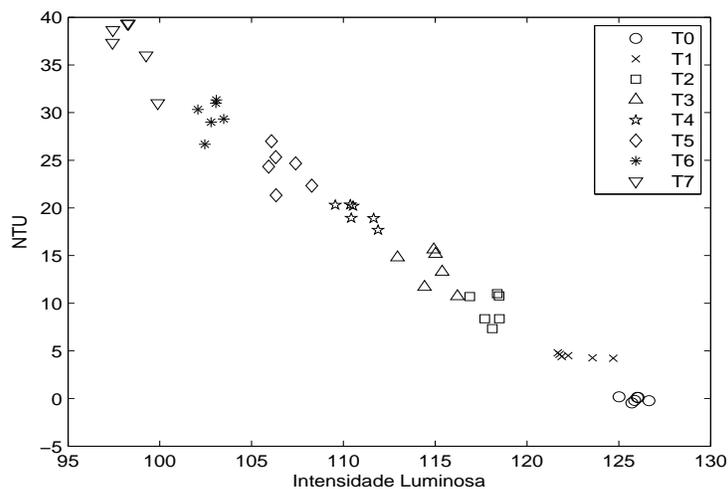
proposta foi de apenas 0,66%. A relação entre os dois conjuntos de dados é mostrada de forma cartesiana na Figura 2.2, na qual uma tendência linear pode ser visualmente percebida.

Tabela 2.4 – Valores de turbidez [NTU] fornecidos pelo turbidímetro tradicional a partir das avaliações em triplicata das 48 amostras do primeiro experimento.

TRATAMENTOS	BLOCOS					
	I	II	III	IV	V	VI
T0	0,00	0,18	0,00	0,00	0,10	0,12
T1	4,63	4,80	4,40	4,27	4,23	4,50
T2	8,37	8,37	10,70	11,00	7,33	10,77
T3	13,30	14,80	15,63	15,17	10,73	11,70
T4	20,20	18,93	20,30	18,90	17,67	20,33
T5	25,33	27,00	21,33	24,33	22,33	24,67
T6	31,00	29,00	29,33	30,33	26,67	31,33
T7	38,67	39,33	37,33	36,00	31,00	39,33

Fonte: Do autor (2017).

Figura 2.2 – Representação cartesiana da correspondência entre os dois conjuntos de dados obtidos a partir da análise das 48 amostras envolvidas no experimento: valores de intensidade luminosa no eixo das abscissas e valores fornecidos pelo turbidímetro tradicional no eixo das ordenadas.



Fonte: Do autor (2017).

Portanto, a partir desses dois conjuntos de dados, seria possível encontrar uma equação para converter a intensidade luminosa associada a uma amostra em um valor cuja unidade seja NTU. Porém, deve-se observar que a utilização de muitos pontos correspondentes entre os dois conjuntos pode ser um empecilho prático. Em geral, a calibração dos turbidímetros tradicionais se dá por meio de cinco ou seis amostras padrão, permitindo que as intensidades luminosas detectadas em cada uma delas sejam associadas a valores previamente conhecidos da escala desejada, por exemplo, NTU. Assim, para manter essa filosofia, apenas os oito resultados do terceiro bloco de cada conjunto de dados foram considerados para a determinação da Equação 2.1, obtida pelo método dos mínimos quadrados, com coeficiente de determinação (R^2) de 98,5 %.

$$T = -1,267 \cdot I + 159,467 \quad (2.1)$$

em que T é o valor de turbidez em NTU, fornecido em função da intensidade luminosa I .

Com o objetivo de validar a Equação 2.1, um segundo experimento foi realizado. Conforme descrito na seção anterior, novas amostras foram produzidas a partir de outro padrão para as concentrações de produto turvador. No entanto, o procedimento de avaliação não foi alterado, ou seja, cada amostra foi analisada pelo método proposto e em seguida pelo turbidímetro, sempre em triplicata. A Tabela 2.5 apresenta as médias das intensidades luminosas e dos valores obtidos com as medições realizadas de forma tradicional.

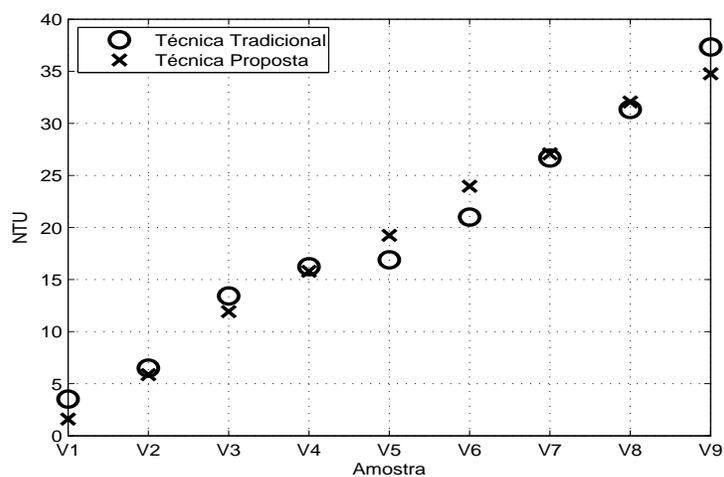
Ao se converter, por meio da Equação 2.1, os resultados mostrados na segunda coluna da Tabela 2.5, foi possível compará-los, em mesma escala, com os resultados fornecidos pelo turbidímetro tradicional. A Figura 2.3 apresenta graficamente esta comparação.

Tabela 2.5 – Resultados das avaliações das nove amostras de validação produzidas para o segundo experimento: por processamento de imagens (tonalidades de cinza entre 0 e 255) e por meio do turbidímetro tradicional [NTU], sempre em triplicata.

AMOSTRA DE VALIDAÇÃO	PROCESSAMENTO DE IMAGENS	TURBIDÍMETRO TRADICIONAL
V1	124,56	3,53
V2	121,19	6,50
V3	116,42	13,43
V4	113,37	16,23
V5	110,64	16,90
V6	106,92	21,00
V7	104,47	26,67
V8	100,54	31,33
V9	98,40	37,33

Fonte: Do autor (2017).

Figura 2.3 – Comparação gráfica dos resultados obtidos por meio do método proposto com os resultados fornecidos pelo turbidímetro tradicional, para as nove amostras produzidas para validar a equação utilizada para expressar valores de intensidade luminosa em NTU.



Fonte: Do autor (2017).

O erro absoluto médio, calculado a partir das nove amostras avaliadas, foi de 1,50 NTU (3,75 % do intervalo entre 0 e 40 NTU). Este valor representa o melhor caso apurado para erro absoluto médio, que ocorre quando os resultados do terceiro bloco das Tabelas 2.1 e 2.4 são utilizados para se determinar os coeficientes da Equação 2.1. O pior cenário acontece quando se utiliza os resultados do segundo bloco, no qual o valor deste erro atinge 2,19 NTU (5,48 % do mesmo intervalo). Estes resultados são satisfatórios e mostram que a técnica proposta é promissora. Além disso, é interessante notar que a concentração de produto turvador aumenta linearmente ao se tomar em sequência as nove amostras de validação. Assim, ao se verificar a relação linear entre estas concentrações e as intensidades luminosas produzidas pelo processamento de imagens, encontra-se um coeficiente de determinação $R^2 = 99,51\%$. Por outro lado, se esta relação for investigada para os valores fornecidos pelo turbidímetro, o coeficiente encontrado é $R^2 = 97,81\%$. Ou seja, há indícios de que o método proposto esteja fornecendo resultados mais exatos do que o turbidímetro tradicional e, sendo assim, é possível que parcelas significativas dos erros encontrados estejam associadas a este último.

Como visto, a principal inovação proposta neste trabalho está na forma de captação e quantificação da luz que atravessa a amostra. Os medidores tradicionais geralmente utilizam um sensor que fornece uma tensão elétrica proporcional à intensidade da luz que captam. Esta tensão é processada por circuitos eletrônicos internos e o resultado da conversão para unidade de turbidez é disponibilizada aos usuários. Já o medidor proposto dispensa o uso de circuito eletrônicos internos, ao passo que usa o poder de processamento de um microcomputador. Vale ressaltar que, com a capacidade dos processadores atuais, a utilização de milhões de *pixels* para caracterização de uma amostra não implica em tempos de análise mais longos do que os despendidos pelos turbidímetros tradicionais. Além disso, caso desejado, a quantidade de *pixels* e outros parâmetros dos programas desenvolvidos podem ser facilmente alterados.

O desenvolvimento das rotinas e funções computacionais utilizadas neste trabalho ocorreu por meio da plataforma MATLAB[®]. No entanto, é possível substituir essa ferramenta por produtos gratuitos, ou mesmo por aplicativos dedicados que, uma vez desenvolvidos, não causem impacto no custo financeiro do método proposto. Os novos desenvolvimentos devem incorporar uma interface gráfica para permitir a operação intuitiva do medidor, a partir da qual o usuário poderá executar ações de calibração e medição, além de visualizar os resultados das análises ou mesmo armazená-los em banco de dados e posteriormente aplicar procedimentos estatísticos. Logicamente, antes de entrar em uma possível fase de comercialização, protótipos precisam ser construídos e características como faixa de medição, resolução e precisão devem ser levantadas por meio de ensaios específicos, uma vez que esta tarefa não figurou como objetivo deste trabalho.

Além de permitir o desenvolvimento de um instrumento para análises de bancada, o método proposto pode ainda viabilizar duas variações deste aparelho: na primeira, a câmera integrada e o poder de processamento dos *smartphones* podem ser utilizados de forma similar ao que foi descrito neste trabalho. Dessa forma, um acessório contendo um emissor laser e um receptáculo para a amostra a ser analisada pode ser acoplado a um *smartphone*, permitindo avaliações *in loco*. Na segunda variação, a utilização de válvulas elétricas na entrada e na saída do instrumento devem permitir análises cíclicas de turbidez. Como os resultados fornecidos pelo processamento de imagens são valores digitais, eles podem ser transmitidos para um controlador que regula a quantidade de produto coagulante a ser adicionado durante um processo de tratamento de água, caracterizando um sistema de automação de baixo custo, o que pode ser um fator significativo para a viabilidade econômica de estações compactas.

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um método que possibilita a medição de turbidez de diversos tipos de líquidos por meio de componentes alternativos em relação à tecnologia dos turbidímetros tradicionais. Para demonstrar sua eficiência, seis repetições de oito tratamentos foram analisadas, sendo que o coeficiente de variação obtido após a análise de variância foi de 0,66 % e, de acordo com o teste de Tukey, todas as médias diferiram estatisticamente entre si ao nível de 1 %. Ao se utilizar um turbidímetro tradicional para avaliar as mesmas amostras, obteve-se um coeficiente de variação de 8,70 %.

Além disso, com o uso de poucas amostras tomadas como referência, foi possível obter uma relação matemática para converter os valores fornecidos pelo processamento de imagens em valores expressos em NTU. Esta relação foi validada ao se analisar diferentes amostras preparadas com acréscimos lineares de produto turvador e produziu resultados mais coerentes do que os fornecidos pelo turbidímetro tradicional, uma vez que um segmento de reta se mostrou mais adequado para descrever o primeiro conjunto de respostas ($R^2 = 99,51\%$) do que o segundo ($R^2 = 97,81\%$).

Dessa forma, avalia-se que a técnica proposta é promissora e pode ser explorada para o desenvolvimento de medidores de turbidez mais confiáveis e que possuam menor custo de produção do que aqueles que se baseiam em métodos tradicionais.

BIBLIOGRAFIA

AMARAL, L.A. et al. Água utilizada em propriedades rurais para o consumo humano e na produção de leite como veículo de bactérias do gênero *Aeromona*. **Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias**, v. 101, p. 103–107, 2006.

CHAI, M. M. E.; NG, S. M.; CHUA, H. S. An alternative cost-effective image processing based sensor for continuous turbidity monitoring. **AIP Conference Proceedings**, v. 1808, p. 020014, 2017.

HART, V. S.; JOHNSON, C. E.; LETTERMAN, R. D. An Analysis of Low-Level Turbidity Measurements. **Journal (American Water Works Association)**, v. 84, p. 40–45, 1992.

HELLER, L.; COLOSIMO, A.E.; ANTUNES, C.M.F. Environmental sanitation conditions and health: impact: a case-control study. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, v. 36, p. 41–50, 2003.

JAMALE, R. S.; PARDESHI, S. A. Turbidity Measurement Using Video Camera. **International Journal of Electrical, Electronics and Computer Systems**, v. 2, p. 17–20, 2014.

KARNAWAT, V.; PATIL, S. L. Turbidity detection using image processing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATION AND AUTOMATION (ICCCA). [S.l.: s.n.], abr. 2016. p. 1086–1089.

KONTTURI, V. et al. Robust sensor for turbidity measurement from light scattering and absorbing liquids. **Optics Letters**, v. 34, p. 3743–3745, 2009.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. [S.l.]: Átomo, 2010. p. 496. ISBN 9788576701651.

RABAL, H. J.; BRAGA, R. A. **Dynamic Laser Speckle and Applications**. [S.l.]: CRC Press, 2008. ISBN 9781420060164.

SALGE, P. et al. Soluções de saneamento para comunidades rurais costeiras: Um modelo tecnicamente apropriado e com participação social. In: VI Encontro de Extensão e Cultura da UFPR: entendendo a extensão. Curitiba: [s.n.], 2007.

VIANA, D. C.; BRAGA, R. A. Turbidímetro de baixo custo baseado em processamento de imagens. In: JUBILEU de Ouro da SBEA. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 9788564681101.

**CAPÍTULO 3 –
DESENVOLVIMENTO DE UM
ALGORITMO PARA
IMPLEMENTAÇÃO DE
CONTROLADORES FUZZY
EM CLPs DE PEQUENO
PORTE¹**

¹ Este capítulo é uma versão atualizada do artigo elaborado por Braz e Viana (2015) durante o desenvolvimento desta Tese, incluindo as alterações sugeridas pelos membros das bancas que a avaliaram nas etapas de qualificação e defesa.

RESUMO

O uso de lógica *fuzzy* para o controle de sistemas em malha fechada é uma realidade em diversos segmentos industriais, principalmente por esta oferecer uma forma simples de se trabalhar com sistemas não-lineares, incertos ou variantes no tempo. Neste trabalho, uma técnica que permite a implementação de controladores *fuzzy* em CLPs de pequeno porte foi desenvolvida, contribuindo para o uso dessa tecnologia dentro das indústrias. O algoritmo proposto permite o balanceamento da taxa de atualização do seu sinal de saída, causando pouco impacto no tempo de ciclo da CPU. Como exemplo, um controlador *fuzzy* foi projetado para estabilizar o nível de água em um tanque. Os testes foram realizados com um CLP da família S7-1200 e apenas a linguagem Diagrama Ladder foi utilizada. Os resultados foram consistentes: para uma larga faixa de operação, a variável controlada acompanhou todos os *setpoints* estipulados, sem a presença de sobressinal ou erro em regime permanente. Além disso, o tempo de ciclo do CLP permaneceu praticamente inalterado, permitindo que os demais trechos do programa fossem interpretados normalmente.

1 INTRODUÇÃO

De forma alternativa às técnicas que propõem o projeto de controladores a partir das equações que descrevem a dinâmica de um determinado sistema, como alocação de polos (LAWARE; BANDAL; TALANGE, 2013), computação evolucionária (ARRUDA et al., 2008) e compensação paralela distribuída (TANAKA; WANG, 2004, p. 25), os controladores *fuzzy* podem se basear na representação, por meio de regras do tipo “SE – ENTÃO”, do conhecimento adquirido por especialistas a respeito de um determinado processo (PASSINO; YURKOVICH, 1997, p. 10). Assim, como a ação de controle é produzida a partir de regras desse tipo, esta técnica ficou conhecida como controle *fuzzy* livre de modelo matemático, ou controle *fuzzy* do tipo Mamdani, em referência aos seus trabalhos pioneiros (MAMDANI; ASSILIAN, 1975; MAMDANI, 1976).

Nestas duas últimas referências é possível verificar que uma das principais características desse método é a facilidade de captura e implementação da natureza contínua do processo de decisão humana. Por essa razão, as aplicações práticas desse tipo de controle começaram a aparecer muito rapidamente após a publicação

dos primeiros resultados sobre esse assunto (LARSEN, 1980; MAMDANI, 1993). No entanto, de forma geral, aplicações em ambiente industrial demandam o uso de Controladores Lógico-Programáveis (CLPs), pois estes são menos suscetíveis a problemas causados por fatores como vibração, temperatura elevada e partículas em suspensão do que os computadores tradicionais (FRANCHI; DE CAMARGO, 2009, p. 29).

Em geral, toda instalação industrial necessita de algum tipo de controlador digital que viabilize um processo produtivo seguro e economicamente rentável. A robustez, mencionada anteriormente, torna os CLPs elementos essenciais nos processos de fabricação de diversos tipos de indústria, como: têxtil (YAN; CHEN; ZHU, 2005), alimentícia (ILYUKHIN; HALEY; SINGH, 2001), celulose (LAPYAN; HU; ZHENG, 2007), vidreira, extrativista (FRUTUOSO BARROSO; BAIDEN; JOHNSON, 2010), química e petroquímica, metalúrgica e siderúrgica etc. Assim, pode-se dizer que os CLPs são dispositivos fundamentais para os processos produtivos na maioria das indústrias do planeta, sejam elas de pequeno, médio ou grande porte. Além disso, segundo Libânio (2010, p. 143), os CLPs são o tipo de controlador digital mais comumente encontrado nos processos de tratamento de água e esgoto.

Atualmente, pode-se encontrar sistemas *fuzzy* implementados em CLPs de variados segmentos industriais. Alguns fabricantes oferecem, para algumas famílias de seus CLPs, *toolboxes* dedicados a esse propósito, como é o caso do *Fuzzy Control++* e do *RSLogix 5000 Fuzzy Designer*, respectivamente desenvolvidos pela *Siemens AG* e *Rockwell Automation* e avaliados em Körösi e Turcsek (2011). No entanto, deve-se ressaltar que, além do custo financeiro dessas ferramentas, elas são destinadas a CLPs de médio e grande porte. Por exemplo, a Tabela 3.1 mostra as principais famílias de CLPs comercializadas pelos mencionados fabricantes. Em ambos os casos, os respectivos *toolboxes* não são compatíveis com os CLPs de pequeno porte, possivelmente por produzirem

códigos de forma automática, que geralmente são pouco otimizados em relação a demanda de processamento ou ao consumo de memória.

Tabela 3.1 – Disponibilidade de *toolboxes* para implementação de lógica *fuzzy* em CLPs de dois fabricantes expressivos, de acordo com as famílias e os portes de seus produtos.

Fabricante	Família	Porte	<i>Toolbox</i> para lógica <i>fuzzy</i>
Siemens AG	S7-400	Grande	<i>Fuzzy Control++</i>
Siemens AG	S7-300	Médio	<i>Fuzzy Control++</i>
Siemens AG	S7-1200	Pequeno	Não disponível
Rockwell Automation	ControlLogix	Grande	<i>RSLogix 5000 Fuzzy Designer</i>
Rockwell Automation	CompactLogix	Médio	<i>RSLogix 5000 Fuzzy Designer</i>
Rockwell Automation	MicroLogix	Pequeno	Não disponível

Fonte: Do autor (2017).

Portanto, dispensando o uso de *toolboxes* como os mencionados, Oliveira, Braga e Almeida (2010) habilitaram o uso de lógica *fuzzy* em CLPs de pequeno porte com o desenvolvimento de um sistema de inferência por meio da linguagem Diagrama Ladder, funções de pertinência descontínuas e um laço de conversão *fuzzy*/escalar que realiza uma iteração a cada ciclo do CLP.

Por sua vez, o algoritmo apresentado na próxima seção, também implementado em linguagem Diagrama Ladder, facilita o uso modular das funções de pertinência, permitindo que elas sejam contínuas ou descontínuas. Além disso, propõe-se que a quantidade de iterações do laço de conversão *fuzzy*/escalar a ser realizada a cada ciclo do CLP possa ser escolhida livremente, tornado particular o caso em que se escolhe uma iteração por ciclo.

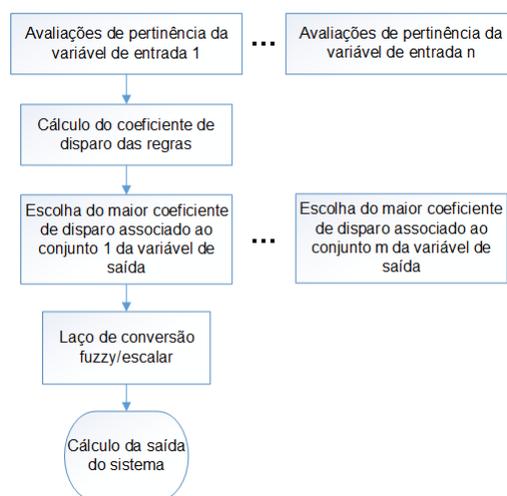
Dessa forma, o propósito deste trabalho foi o desenvolvimento de uma técnica que viabiliza a implementação de controladores *fuzzy* em CLPs de pequeno porte, possibilitando o uso dessa tecnologia em qualquer processo que seja controlado por um CLP, independentemente das características deste último. Para

tal, as seguintes etapas foram cumpridas: projeto e implementação de um sistema de inferência *fuzzy*, considerando o poder de processamento, as limitações de memória e as linguagens de programação disponíveis para os CLPs de pequeno porte; validação teórica, comparando os resultados fornecidos pelo CLP com os fornecidos por um computador convencional, no qual o mesmo sistema foi implementado em linguagem de alto nível; validação prática, por meio de um sistema de controle de nível em malha fechada, no qual a velocidade de uma bomba de água foi calculada por um controlador *fuzzy*, implementado com a técnica proposta.

2 METODOLOGIA

Assim como em Reyes (2004, p. 17), o algoritmo de um sistema de inferência *fuzzy* com n entradas e uma saída pode ser explicado pelo fluxograma mostrado na Figura 3.1 e suas descrições, apresentadas em seguida.

Figura 3.1 – Fluxograma das principais etapas de processamento de um sistema de inferência *fuzzy* com n entradas e uma saída.



Fonte: Adaptado de Reyes (2004, p. 18).

Na primeira etapa, conhecida como conversão escalar/*fuzzy*, são avaliadas as pertinências das n variáveis de entrada em relação a todos os conjuntos que descrevem seus respectivos universos de discurso. Isso pode ser realizado com a implementação modular de funções que permitem o uso de conjuntos triangulares, trapezoidais, sigmoidais etc. Por exemplo, uma função que recebe os parâmetros x , a , b e c , pode calcular a pertinência de x em relação ao conjunto descrito pelo triângulo de vértices $(a, 0)$, $(b, 1)$ e $(c, 0)$ e transferir o resultado para uma saída y .

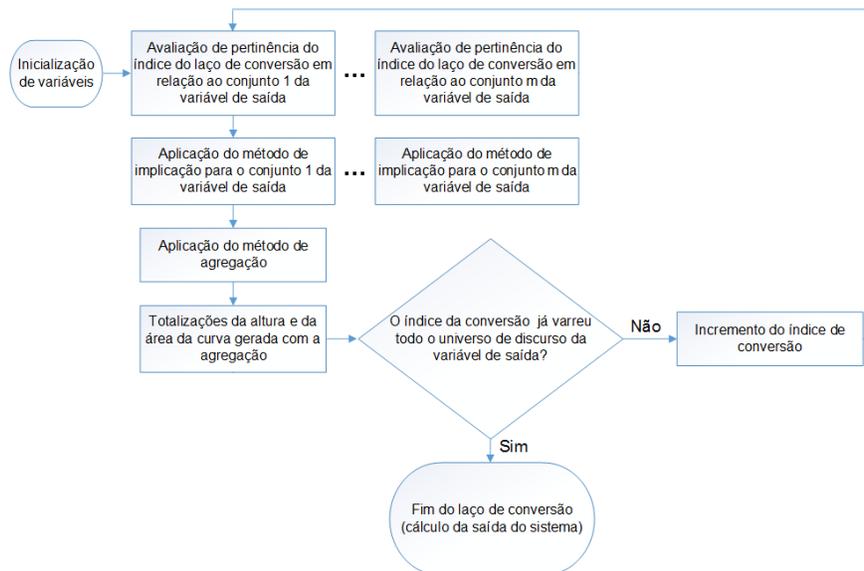
Em seguida, calcula-se o coeficiente de disparo de cada regra do banco de conhecimento. Posteriormente, para cada grupo de regras cujo termo consequente está associado a um determinado conjunto do universo de discurso da variável de saída, seleciona-se o coeficiente de disparo de maior valor. Por exemplo,

se a variável de saída do sistema *fuzzy* for “velocidade”, seleciona-se o maior coeficiente de disparo entre as regras associadas ao conjunto “velocidade baixa”, o maior coeficiente de disparo entre as regras associadas ao conjunto “velocidade média” e assim por diante.

Como a inovação proposta neste trabalho está justamente no laço em que ocorre a conversão *fuzzy*/escalar, esta etapa será analisada com mais detalhes. A Figura 3.2 mostra o algoritmo tradicional² (REYES, 2004, p. 11) para esse laço, desenvolvido para um sistema *fuzzy* que utiliza os seguintes métodos:

- Implicação: mínimo;
- Agregação: máximo;
- Conversão fuzzy/escalar: centro de massa.

Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo tradicional para o laço de conversão *fuzzy*/escalar por meio do método do centro de massa.



Fonte: Adaptado da descrição textual dada em Reyes (2004, p. 11).

² Porém, como os CLPs não fazem operações matriciais, as etapas de implicação e agregação foram convenientemente transferidas para dentro do laço em questão.

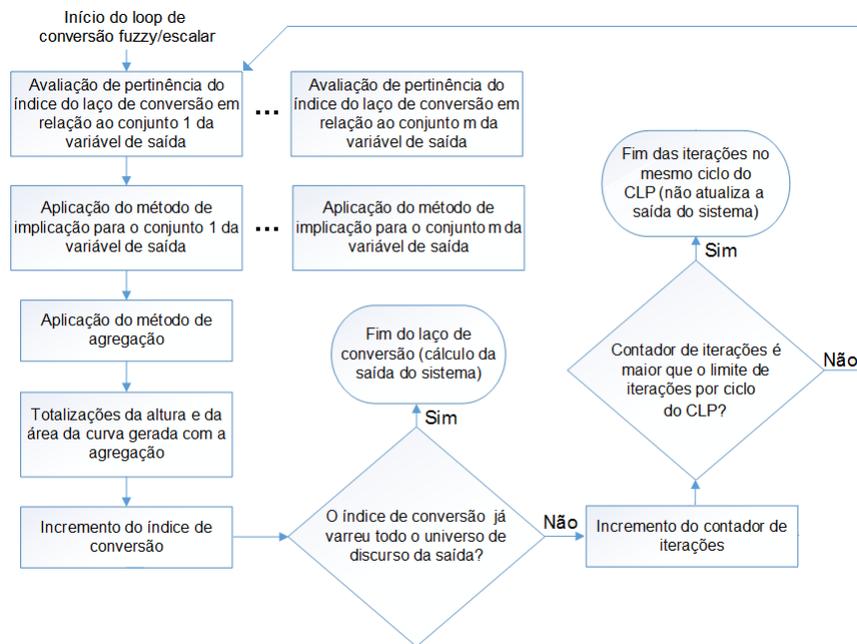
Durante a inicialização, três variáveis recebem o valor zero: o índice do laço, o totalizador de altura e o totalizador de área. Em seguida, para cada iteração do laço, cujo índice deve amostrar todo universo de discurso da variável de saída, faz-se:

- Avaliação da pertinência do índice do laço em relação a todos os conjuntos que descrevem o universo de saída;
- Aplicação do método de implicação: para cada conjunto que descreve o universo de saída, determina-se o valor mínimo entre a pertinência recém calculada (veja o item anterior) e o respectivo coeficiente de disparo de maior valor, selecionado na etapa anterior ao laço da conversão *fuzzy*/escalar (veja a Figura 3.1);
- Aplicação do método de agregação: determina-se o maior valor entre os mínimos recém calculados. Ou seja, este resultado representa a altura da curva gerada com a agregação dos conjuntos que descrevem o universo de saída;
- Totalização dos valores de altura calculados em cada iteração do laço. Os valores de área também são totalizados, fazendo-se o acúmulo do resultado do produto entre a altura da curva e o índice do laço.

Após o término das iterações deste laço, a saída do sistema é calculada de forma simples, fazendo-se a divisão da área totalizada pela altura totalizada. Sendo assim, deve-se ressaltar que a maior parte do custo computacional de um sistema *fuzzy* está associado ao laço da conversão *fuzzy*/escalar. Por exemplo, para a variável de saída “velocidade”, supondo um universo de discurso entre 20 e 79 % e coberto por 5 conjuntos *fuzzy*, será necessário avaliar 300 pertinências dentro do laço se esse universo for amostrado com passos de 1 %.

Em alguns casos, o custo computacional mencionado pode ser um fator impeditivo para implementações em CLPs, especialmente para CPUs de pequeno porte. Portanto, Oliveira, Braga e Almeida (2010) propõem que cada iteração do laço em que ocorre a conversão *fuzzy*/escalar seja realizado em um ciclo do CLP. Tal solução é um caso particular do algoritmo proposto na Figura 3.3, no qual a quantidade de iterações do laço de conversão a ser realizada em cada ciclo do CLP pode ser escolhida livremente.

Figura 3.3 – Fluxograma do algoritmo proposto para o laço de conversão *fuzzy*/escalar por meio do método do centro de massa.



Fonte: Do autor (2017).

Este novo algoritmo é similar ao tradicional. No entanto, além do índice do laço de conversão *fuzzy*/escalar, um contador de iterações por ciclo do CLP também foi utilizado. A cada execução do algoritmo, este último recebe o valor zero. Já o índice do laço e os totalizadores de altura e área são inicializados apenas na primeira chamada do algoritmo e após o término da amostragem do universo de

discurso da variável de saída. Por exemplo, para a situação descrita anteriormente, na qual se supõe um universo de discurso para a variável de saída “velocidade”, se dez iterações forem estipuladas por ciclo, a saída do sistema *fuzzy* será atualizada a cada seis ciclos do CLP, sendo que 50 pertinências serão avaliadas dentro do laço de conversão.

Esta ponderação entre a taxa de atualização da saída do sistema *fuzzy* e o custo computacional que o mesmo impõe a cada ciclo do CLP pode ser muito importante em algumas situações. Em aplicações reais, é bastante provável que o CLP execute várias outras tarefas não vinculadas ao sistema *fuzzy*. Uma grande quantidade de iterações do laço em que ocorre a conversão escalar/*fuzzy* a cada ciclo pode prejudicar a execução das outras tarefas. Por outro lado, com as demais tarefas elevando o tempo de cada ciclo, a taxa de atualização da saída do sistema *fuzzy* pode não ser suficiente, caso vários ciclos sejam necessários para que essa atualização ocorra.

A implementação³ do algoritmo proposto ocorreu por meio de um conjunto de funções. A primeira delas recebe as variáveis de entrada do sistema e realiza a conversão escalar/*fuzzy* e o processamento do banco de regras, conforme mostrado nas três primeiras etapas da Figura 3.1. Entre as regras associadas a um determinado conjunto do universo de discurso da variável de saída, determina-se o coeficiente de disparo de maior valor. Isso é feito para todos os conjuntos, e os coeficientes selecionados são fornecidos nas saídas da função.

A segunda função, por sua vez, recebe em suas entradas os coeficientes calculados pela primeira e implementa o laço de conversão *fuzzy*/escalar mostrado na Figura 3.3. Outro parâmetro recebido é a quantidade de iterações a serem realizadas em cada ciclo do CLP. Já as saídas, são: o resultado do sistema de inferência *fuzzy* e um *flag* que sinaliza o momento em que esse resultado foi atualizado. Ou seja, a primeira saída da função é mantida em seu último estado até

³ Disponível em <https://goo.gl/8vodWh>

que o laço da conversão *fuzzy*/escalar tenha percorrido todo o universo da variável de saída do sistema *fuzzy*.

As demais funções realizam tarefas auxiliares e são utilizadas pelas duas primeiras. Por exemplo, a avaliação da pertinência de um escalar em relação a um conjunto *fuzzy* e a determinação do maior ou do menor valor entre aqueles apresentados como parâmetros de entrada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em um primeiro momento, para verificar a consistência do método proposto neste trabalho, o sistema *fuzzy* descrito a seguir foi implementado em duas plataformas: em um CLP da família S7-1200, por meio da ferramenta “Step7 V12” (Siemens); e em um PC convencional, por meio da ferramenta “Fuzzy Logic Toolbox” (MathWorks). O propósito do sistema usado neste exemplo é controlar o nível de água em um reservatório por meio de uma bomba elétrica que o alimenta.

Para tal, o controlador foi projetado para considerar duas entradas: a primeira (SET), recebe o valor desejado para o nível, em uma faixa entre 0 e 500 mm; e a segunda (ERR) foi configurada para receber os valores de erro, ou seja, os resultados da diferença entre o valor desejado e o valor atual do nível, que podem variar entre -500 e 500 mm. Por sua vez, a saída do controlador (VEL) é a velocidade da bomba, que foi programada para variar entre 0 e 30% de sua capacidade.

Dessa forma, os conjuntos *fuzzy* que cobrem os universos de discurso dessas variáveis foram definidos de acordo com a Tabela 3.2 e os sete termos linguísticos que compõem o banco de regras são mostrados a seguir, sendo que a operação “E” foi definida como o produto das pertinências de cada variável em relação ao seu respectivo conjunto.

1. SE ERR = Neg ENTÃO VEL = EBx
2. SE ERR = Nul E SET = MBx ENTÃO VEL = MBx
3. SE ERR = Nul E SET = Bxo ENTÃO VEL = Bxa
4. SE ERR = Nul E SET = Med ENTÃO VEL = Med
5. SE ERR = Nul E SET = Alt ENTÃO VEL = Alt
6. SE ERR = Nul E SET = MA_t ENTÃO VEL = MA_t
7. SE ERR = Pos ENTÃO VEL = EA_t

Tabela 3.2 – Variáveis de entrada e saída do controlador e os conjuntos *fuzzy* que cobrem seus respectivos universos de discurso. Para as funções de pertinência triangulares, as colunas *a*, *b* e *c* contêm os valores que formam os vértices (*a*, 0), (*b*, 1) e (*c*, 0). Para os casos em que a coluna *d* é utilizada, os valores definem conjuntos trapezoidais de vértices (*a*, 0), (*b*, 1), (*c*, 1) e (*d*, 0).

Variável	Conjunto	a	b	c	d
SET	MBx	-50	-50	100	
	Bxo	-50	100	250	
	Med	100	250	400	
	Alt	250	400	550	
	MAt	400	550	550	
ERR	Neg	-500	-500	-50	-1
	Nul	-50	0	50	
	Pos	1	50	500	500
VEL	EBx	0	0	6	8
	MBx	5	7	9	
	Bxa	6	8	10	
	Med	7	9	11	
	Alt	8	10	12	
	MAt	9	11	13	
	EAt	10	12	30	30

SET: *setpoint* (valor desejado para o nível) [mm]

ERR: erro (diferença entre o nível desejado e o atual) [mm]

VEL: sinal de controle (velocidade da bomba de água) [%]

Fonte: Do autor (2017).

A Tabela 3.3 mostra os resultados fornecidos pelas duas plataformas (CLP e PC), para alguns pares de valores apresentados em suas entradas. Ao se analisar esses resultados, pode-se observar que as diferenças são mínimas, provavelmente causadas por condicionamento numérico, indicando a coerência da implementação do algoritmo proposto.

Tabela 3.3 – Comparação dos resultados fornecidos pelas duas implementações do mesmo controlador *fuzzy*: no CLP, por meio da técnica proposta, e no PC, por meio da ferramenta “Fuzzy Logic Toolbox” (MathWorks).

Entrada 1 (SET)	Entrada 2 (ERR)	Saída no CLP (VEL)	Saída no PC (VEL)
100	300	20,62	20,60
200	300	20,62	20,60
150	20	18,51	18,40
250	20	18,44	18,40
350	20	19,04	19,00
150	-5	7,19	7,24
250	-5	7,69	7,73
350	-5	8,19	8,24
300	-150	3,40	3,45
400	-150	3,40	3,45

Fonte: Do autor (2017).

Após esta primeira validação, o controlador implementado no CLP foi utilizado em um sistema real, para controlar o nível de uma planta didática, cujos principais componentes são: reservatório com capacidade para 5 L (base 100×100 mm e altura 500 mm) e escoamento livre; bomba de água, controlada por circuito baseado em PWM que, por sua vez, recebe um sinal de 0..10 V do CLP; medidor de nível hidrostático, que envia um sinal de 0..10 V ao CLP.

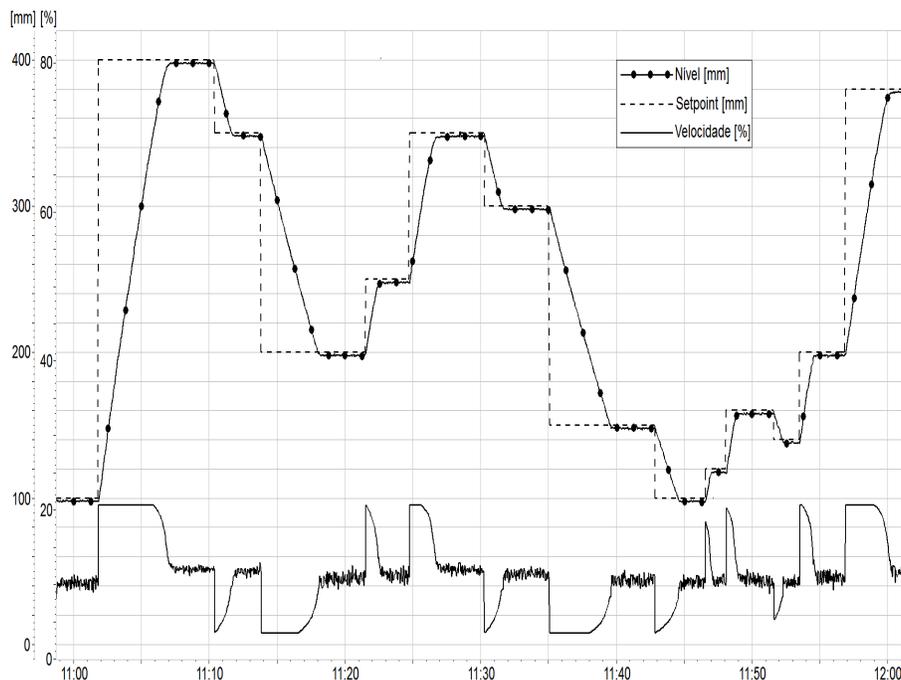
Neste segundo exemplo, o universo de discurso da variável de saída (VEL) foi mantido entre 0 e 30 % e o incremento do laço de conversão *fuzzy*/escalar foi estipulado em 0,5 %. Consequentemente, 61 iterações se tornaram necessárias para a atualização do sinal de controle, sendo que o controlador foi parametrizado de forma que no máximo 10 iterações fossem realizadas em cada ciclo do CLP.

Dessa forma, o tempo de varredura da CPU (modelo 1214C) foi mantido abaixo de 7 ms, evidenciando o baixo custo computacional do algoritmo proposto.

No caso em que todas as iterações são realizadas no mesmo ciclo, como proposto em Reyes (2004), o valor obtido foi 23 ms. Como base de comparação, o tempo médio de varredura relatado em Oliveira, Braga e Almeida (2010), em um problema de dimensões similares, foi de 120 ms.

Para demonstrar a eficiência do controlador projetado, a planta foi operada durante 60 minutos, nos quais o *setpoint* foi alterado diversas vezes, dentro de uma larga faixa de operação. Um sistema de supervisão e controle foi utilizado para fazer a aquisição das variáveis relevantes, sendo que seus comportamentos podem ser observados na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Exemplo de funcionamento do controlador durante 60 minutos, no qual podem ser observados: o nível real (linha com círculos inseridos), o *setpoint* (linha tracejada) e o sinal de controle (linha sólida). Os dois primeiros na escala de 0 a 400 mm e o último na escala de 0 a 80 %.



Fonte: Do autor (2017).

Como visto, o funcionamento do sistema de controle em malha fechada foi satisfatório, destacando-se as ausências práticas de erro em regime permanente e de sobressinal, em todos os pontos de operação testados durante o ensaio. Todavia, as potencialidades dos sistemas *fuzzy* já são amplamente conhecidas, cabendo destacar a eficiência do método desenvolvido para aplicá-las por meio de CLPs de pequeno porte.

Apesar de serem facilmente adaptáveis a outras aplicações, as principais funções desenvolvidas foram codificações específicas do controlador utilizado como exemplo. Sendo assim, como sugestão para trabalhos futuros, pode-se mencionar implementações mais gerais dessas funções, permitindo que universos de discurso, funções de pertinência e o banco de conhecimento sejam configurados por meio de valores contidos em determinadas áreas de memória do CLP.

4 CONCLUSÃO

O algoritmo proposto neste trabalho permite a ponderação entre a taxa de atualização da saída de um sistema de inferência *fuzzy* e o custo computacional que este impõe a cada ciclo do CLP. Tal recurso pode ser um fator significativo, que viabiliza a implementação de sistemas *fuzzy* em CLPs de pequeno porte, contribuindo para o uso dessa tecnologia dentro das indústrias.

No exemplo apresentado, um controlador *fuzzy* foi utilizado para estabilizar o nível de água em um tanque. A planta foi operada durante 60 minutos e, em todos os pontos de operação testados, não ocorreram sobressinal ou erro em regime permanente relevante. O tempo de varredura do CLP permaneceu abaixo de 7 ms, sendo que a média deste tempo aumentou para 23 ms no caso em que o balanceamento proposto foi desativado.

O bom desempenho do sistema de controle de nível e seu baixo impacto no tempo de varredura do CLP de pequeno porte mostraram a viabilidade e a relevância do método proposto. Além disso, deve-se destacar que não só controladores em malha fechada, mas qualquer sistema de inferência *fuzzy* pode ser implementado da forma apresentada.

BIBLIOGRAFIA

ARRUDA, L.V.R. et al. Um método evolucionário para sintonia de controladores PI/PID em processos multivariáveis. **SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 19, p. 1–17, 2008.

BRAZ, P. H. A.; VIANA, D. C. Implementação de controladores fuzzy em CLPs de pequeno porte. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI). [S.l.: s.n.], 2015.

FRANCHI, C.M.; DE CAMARGO, V.L.A. **Controladores Lógico Programáveis – Sistemas Discretos**. 2. ed. [S.l.]: Érica, 2009.

FRUTUOSO BARROSO, A.R.; BAIDEN, G.; JOHNSON, J. Knowledge Representation and Expert Systems for Mineral Processing Using Infobright. In: GRANULAR Computing (GrC), 2010 IEEE International Conference on. [S.l.: s.n.], ago. 2010. p. 49–54.

ILYUKHIN, S.V.; HALEY, T.A.; SINGH, R.K. A survey of automation practices in the food industry. **Food Control**, v. 12, n. 5, p. 285–296, 2001.

KÖRÖSI, L.; TURCSEK, D. Fuzzy System for PLC. **Institute of Control and Industrial Informatics, Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology**, 2011.

LAPYAN, Y.; HU, J.; ZHENG, G. Investigation on liquid ammonia treatment of shape-memory cellulose fabric. **Dyeing & Finishing**, v. 6, 2007.

LARSEN, P. M. Industrial applications of fuzzy logic control. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 12, p. 3–10, 1980.

LAWARE, A.R.; BANDAL, V.S.; TALANGE, D.B. Real Time Temperature Control System Using PID Controller and Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA). **International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management**, v. 2, p. 88–95, 2013.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. [S.l.]: Átomo, 2010. p. 496. ISBN 9788576701651.

MAMDANI, E. H. Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. In: PROCEEDINGS of the Sixth International Symposium on Multiple-valued Logic. [S.l.]: IEEE Computer Society Press, 1976. p. 196–202.

_____. Twenty years of fuzzy control: experiences gained and lessons learnt. In: [PROCEEDINGS 1993] Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems. [S.l.: s.n.], 1993. v. 1, p. 339–344.

MAMDANI, E.H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 7, p. 1–13, 1975.

OLIVEIRA, D.N.; BRAGA, A.P.S.; ALMEIDA, O.M. Fuzzy Implementado em Ladder com Funções de Pertinência Descontínuas. In: CONGRESSO Brasileiro de Automática, XVIII. Bonito-MS: [s.n.], 2010. p. 411–416.

PASSINO, K.M.; YURKOVICH, S. **Fuzzy Control**. 1st. [S.l.]: Addison-Wesley, 1997.

REYES, C. A. P. **Coevolutionary Fuzzy Modeling**. 1st. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

TANAKA, K.; WANG, H.O. **Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach**. [S.l.]: Wiley, 2004. ISBN 9780471465225.

YAN, L.P.; CHEN, Z.N.; ZHU, X.J. Study of draw texturing machine's control system based on PLC. **JOURNAL OF TEXTILE RESEARCH**, v. 26, n. 2, 2005.

**CAPÍTULO 4 – DOSAGEM
AUTOMÁTICA DE PRODUTO
COAGULANTE A PARTIR DE
MEDIÇÕES DE TURBIDEZ
BASEADAS EM
PROCESSAMENTO DE
IMAGENS¹**

¹ Este capítulo possui o formato de artigo científico pois, após a conclusão desta Tese, deverá ser submetido a um periódico ainda não definido. Seus coautores são: Pedro Pinheiro de Siqueira, Roberto Alves Braga Jr. e Luiz Fernando Coutinho de Oliveira.

RESUMO

A dosagem automática de produtos químicos representa um dos principais benefícios que os sistemas de automação podem levar aos processos de tratamento de água. No entanto, a necessidade de investimentos em equipamentos pode desencorajar o uso desses sistemas e, em alguns casos, inviabilizar a implantação das estações de tratamento, especialmente as de pequeno porte. Dessa forma, a busca por soluções menos onerosas torna-se um objetivo de grande interesse em um cenário no qual a potabilização das águas naturais é cada vez mais necessária. No presente trabalho, um sistema de dosagem de produto coagulante foi desenvolvido por meio de um turbidímetro baseado em processamento de imagens e de um controlador *fuzzy* implementado em um CLP de pequeno porte. Seu desempenho foi avaliado por meio de uma planta piloto e os resultados obtidos foram satisfatórios em todas as repetições do procedimento experimental adotado, indicando a viabilidade do método proposto.

1 INTRODUÇÃO

Grande parte das águas *in natura* apresentam características que as impedem de serem consideradas potáveis. Entretanto, muitas vezes, tais características podem ser manipuladas de forma que os limites que estabelecem esta condição sejam atingidos. Em geral, essa manipulação é realizada pelas Estações de Tratamento de Água (ETAs), configurando-as como sistemas fundamentais para o abastecimento de água potável em regiões urbanas e rurais (SHANNON et al., 2008).

A escolha dos métodos utilizados em um processo de tratamento de água depende de diversos aspectos, destacando-se aqueles atrelados à localização da estação, como temperatura e turbidez da água captada, e também os estipulados para o produto final, como demanda e qualidade (BELISÁRIO et al., 2009). O tratamento de ciclo completo, também denominado como convencional, é o mais utilizado nas ETAs do Brasil (LIBÂNIO, 2010, p. 148), empregando a sedimentação estimulada por produto coagulante e etapas bem definidas, na seguinte sequência: coagulação, floculação, decantação, filtração e, por fim, desinfecção.

No Brasil, verifica-se que tais etapas vêm sendo aprimoradas a partir de meados da década de 1990, com a incorporação de novas técnicas, variantes e automatismos (LIBÂNIO, 2010, p. 140). Com relação a este último aspecto, as principais aplicações são: controle da vazão de entrada do processo por meio de válvulas proporcionais ou inversores de frequência, que ajustam a velocidade das bombas de captação (TIWARI; ADAMOWSKI, 2013); execução autônoma da operação de retrolavagem dos filtros por meio de válvulas solenóides, que pode ser disparada por uma chave de nível alto e encerrada ao se detectar turbidez satisfatória na água descartada (BURLINGAME; PICKEL; ROMAN, 1998); e adição de produto coagulante e/ou desinfetante por meio de bombas dosadoras, que controlam suas respectivas vazões de acordo com informações fornecidas por instrumentos de medição apropriados (NAM et al., 2013; YU et al., 2009). Entre os benefícios que oferecem, os sistemas de automação podem chegar a viabilizar tecnicamente e economicamente algumas estações de tratamento antes improváveis, permitindo a adequação da água de diversas fontes de captação aos padrões de um determinado país ou região e reduzindo o consumo de produtos químicos e as despesas com a mão-de-obra operacional (LIBÂNIO, 2010, p. 143).

Conforme Libânio (2010, p. 29), a turbidez é um dos principais atributos a serem monitorados nas ETAs, tanto no afluente como no efluente. Dessa forma, seu controle, por meio da dosagem de agentes coagulantes, pode ser considerado de grande interesse. O principal objetivo é manter a turbidez da água tratada (produto final) em um patamar desejado, usualmente inferior a 1 NTU, mesmo na presença de mudanças repentinas nas condições da água captada (como as causadas por precipitações) ou da demanda (como as que ocorrem nas datas comemorativas de uma localidade) (CHEN; HOU, 2006; WU; LO, 2008). Uma vez que tais mudanças podem acontecer fora da jornada de trabalho regulamentar, fica claro que um sistema automatizado, em complemento ao seu objetivo de

aumentar a qualidade da água potabilizada, pode reduzir a necessidade de mão-de-obra e o consumo de produto coagulante.

Uma das formas de realizar este controle é por meio de um sistema *fuzzy*, no qual o comportamento dos operadores da planta pode ser representado por um conjunto de regras do tipo “SE – ENTÃO”, como, por exemplo: se a vazão e a turbidez do afluente forem baixas, então deve-se adicionar pouco produto coagulante. Sistemas como este podem ser implementados em Controladores Lógico-Programáveis (CLPs) por meio da abordagem proposta em Braz e Viana (2015), gerando um sinal de controle para a bomba dosadora. No entanto, é importante observar que este sistema deve ser constantemente alimentado com informações sobre a vazão e a turbidez da água que entra no processo de tratamento.

Tradicionalmente, os medidores eletrônicos de turbidez baseiam-se em um sensor que converte a intensidade luminosa que atravessa a amostra em análise em um sinal elétrico (KELLEY et al., 2014) e podem ser classificados em duas categorias: medidores de bancada, apropriados para análises manuais e esporádicas, nos quais os resultados são normalmente apresentados ao usuário por meio de um *display* de cristal líquido; e medidores de processo, voltados para monitorações contínuas, nos quais os resultados são fornecidos para um sistema de aquisição de dados ou controlador digital, em geral, por meio de sinais elétricos no padrão 4..20 mA, 0..10 V ou similares.

Em Viana e Braga (2015), um método para medição de turbidez por processamento de imagens foi desenvolvido, abrindo caminho para uma possível manufatura de medidores de bancada financeiramente mais atraentes. Além disso, percebeu-se que a técnica utilizada também poderia ser aplicada, basicamente da mesma forma, em medidores de processo. Em geral, estes últimos possuem custos financeiros elevados, o que pode ser um fator impeditivo para a instalação de sistemas de dosagem automática em estações de tratamento compactas, tornando

a técnica em questão ainda mais atrativa. Dessa forma, no presente trabalho, o protótipo de um medidor de turbidez voltado para uso em sistemas de automação foi desenvolvido e a hipótese é de que, ao se utilizá-lo para monitorar a turbidez da água na entrada de um processo de tratamento, em conjunto com um medidor de vazão, um controlador *fuzzy* possa calcular a quantidade de produto coagulante a ser adicionada ao tratamento, com base em regras linguísticas similares as que os humanos utilizam em seus processos de decisão.

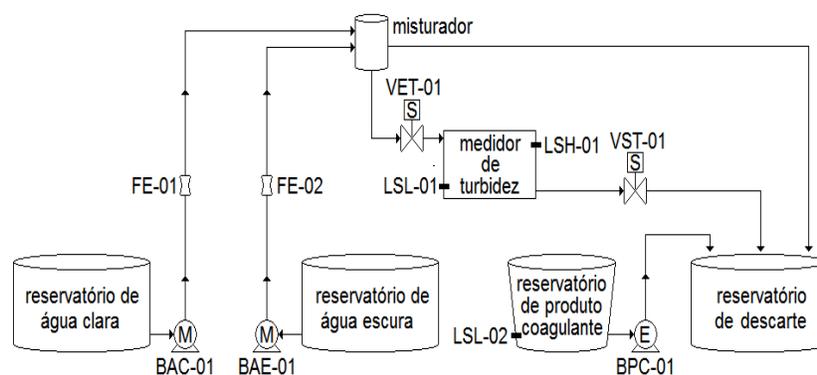
Assim como em trabalhos similares (CHEN; PELDSZUS et al., 2014; GARCÍA-VAQUERO et al., 2014), uma planta piloto foi utilizada como suporte para a verificação da hipótese investigada, neste caso composta por três subsistemas: captação de água, amostragem automática e dosagem de produto coagulante. Portanto, os objetivos do presente trabalho foram o projeto e a construção do medidor proposto e da planta piloto, incluindo o desenvolvimento de um sistema de automação para integrá-los.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Instrumentação e Material Hidráulico

A parte experimental deste trabalho foi conduzida em uma planta piloto projetada e construída para reproduzir as etapas de captação e dosagem de produto coagulante de uma estação de tratamento de água. Além disso, conforme pode ser observado na Figura 4.1, esta planta possui um sistema automático de amostragem cujo objetivo é permitir que a turbidez da água captada seja ciclicamente mensurada.

Figura 4.1 – Principais componentes da planta piloto: reservatórios, bombas elétricas, válvulas solenóides, medidores de vazão e turbidez, chaves de detecção de nível e conexões hidráulicas.



Fonte: Do autor (2017).

As conexões hidráulicas foram estabelecidas por meio de mangueiras de poliuretano de 6 mm e conectores de engate rápido, com exceção do trecho entre o misturador e o reservatório de descarte, para o qual foi utilizado uma mangueira convencional de 3/8" e conectores apropriados. Os recipientes utilizados são de plástico e possuem capacidade individual de 35 L, com exceção do reservatório de produto coagulante e do misturador, com respectivas capacidades de 15 L e 0,7 L.

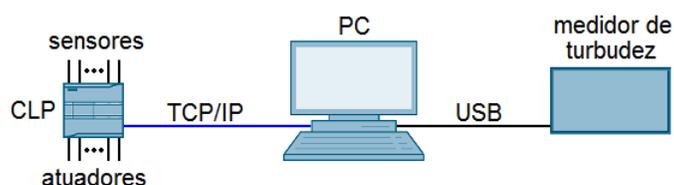
Por sua vez, as principais características dos sensores e atuadores que aparecem na Figura 4.1 são:

- Bombas de Água (BAC-01 e BAE-01) – Bombas elétricas genéricas (em geral, utilizadas nos sistemas de limpeza de para-brisas de automóveis), com uma entrada e uma saída apropriadas para mangueiras de 6 mm e capacidade para fornecer fluxos de até 3000 mL min^{-1} , que podem ser estipulados por meio da alimentação elétrica, entre 0 e 12 V;
- Medidores de vazão (FE-01 e FE-02) – Medidores YF-S401 (Se^a), com capacidade para aferir fluxos entre 300 e 6000 mL min^{-1} , fornecendo em suas saídas elétricas pulsos com amplitude de 8 V e frequência proporcional ao fluxo de líquido que os atravessa;
- Válvulas Solenóides (VET-01 e VST-01) – Válvulas 5124–1122C (Werk-Schott Pneumática), com uma entrada e uma saída apropriadas para mangueiras de 6 mm e comando elétrico para abrir (normalmente fechadas), realizado com tensão de 24 V;
- Medidor de Turbidez e Chaves de Nível (LSH-01 e LSL-01) – Este medidor foi projetado e construído paralelamente à planta piloto e, como é um dos focos deste trabalho, será apresentado de forma detalhada no Tópico 2.3, inclusive com a descrição das duas chaves de nível que incorpora;
- Chave de nível (LSL-02) – Chave LA16M-40 (ICOS), para detecção da presença de líquido no ponto em que está instalada, podendo ser montada na forma normal-aberta ou normal-fechada e assim, de acordo com esta montagem, permitindo ou interrompendo a passagem de corrente elétrica por seus terminais;
- Bomba de Produto Coagulante (BPC-01) – Bomba dosadora FIC 121,5 (EMEC), com capacidade para realizar dosagens entre 10 e 300 mL min^{-1} , de acordo com um sinal referência no padrão de corrente 4..20 mA.

2.2 Automação e Resumo do Funcionamento

Conforme pode ser observado na Figura 4.2, o sistema de automação² da planta piloto é fisicamente constituído por um microcomputador (PC) e um Controlador Lógico-Programável (CLP), que interagem com os sensores e atuadores descritos anteriormente.

Figura 4.2 – Principais elementos do sistema de automação da planta piloto e suas interações: CLP, comunicando-se via protocolo *ethernet* com o PC, que por sua vez se comunica via interface USB com a câmera embutida no medidor de turbidez.



Fonte: Do autor (2017).

No PC (6005 Pro Microtower, HP), foram instaladas as plataformas de desenvolvimento MATLAB[®] (MathWorks), SIMATIC WinCC (Siemens) e a ferramenta PC Access (Siemens). A primeira executa o *script* descrito no Tópico 2.3, responsável pelo processamento das imagens relacionadas às medições de turbidez. A plataforma SIMATIC WinCC permite tanto o desenvolvimento como a execução do sistema supervisório, no qual o usuário faz a operação da planta, visualizando informações e aplicando suas decisões. E o último, PC Access, viabiliza a comunicação dos dois primeiros com o CLP, por meio da tecnologia OPC (do termo em inglês, *Open Platform Communications*). Isso permitiu, por exemplo, que os valores de turbidez das amostras analisadas com o medidor proposto fossem enviados ao CLP por meio do protocolo *ethernet*.

² Os aplicativos desenvolvidos estão disponíveis em <https://goo.gl/A2F3eY>

Por sua vez, o CLP (S7-1200, Siemens) foi responsável por receber os comandos e parâmetros enviados pelo sistema supervisor, como “abrir válvula” e “referência de velocidade para a bomba”, realizar a leitura de suas entradas elétricas, nas quais foram conectados elementos como os medidores de vazão e as chaves de detecção de nível, processar o programa armazenado em sua memória e atualizar suas saídas elétricas, nas quais foram conectadas as válvulas e motores da planta. O programa desenvolvido foi estruturado em sub-rotinas que tratam os elementos da planta piloto de forma modular. De forma resumida, esses módulos, seus respectivos componentes e suas funcionalidades são descritos a seguir.

- Captação de água – Esta parte da planta é composta por dois reservatórios: um de água clara e outro de água escura. Cada um deles é drenado por uma bomba elétrica, cujas saídas são levadas aos respectivos medidores de vazão e posteriormente confluem em um recipiente misturador. Com o objetivo de manter as vazões produzidas pelas bombas o mais próximo possível de patamares desejados, dois controladores PI (Proporcional-Integral) foram implementados no CLP para manipular suas velocidades. Além disso, foi implementado um sequenciador de patamares, permitindo que, por meio de configurações prévias, a vazão de cada bomba fosse periodicamente alterada de forma independente. Isso permitiu impor diversas situações ao sistema de dosagem automática, uma vez que, alterando-se essas vazões, a turbidez no misturador também sofreu alterações.
- Amostragem automática – Duas válvulas solenóides foram utilizadas para coletar automaticamente amostras da água bombeada para o recipiente misturador. A primeira válvula controla a entrada de água na cubeta interna do turbidímetro proposto, sendo mantida aberta até que uma chave de nível alto detecte esta condição. Quando isto acontece, inicia-se a aquisição das imagens que determinam a turbidez da amostra. Terminada a aquisição, a segunda válvula é aberta, permitindo que a amostra escoe para o reservatório

de descarte. Quando uma chave de nível baixo detecta o fim do escoamento, o ciclo de medição pode ser reiniciado;

- Dosagem de produto coagulante – A turbidez apurada pelo medidor proposto e a soma dos resultados fornecidos pelos medidores de vazão alimentam as duas entradas do controlador *fuzzy* implementado no CLP. Por sua vez, este controlador produz em sua saída um sinal que regula a intensidade da bomba dosadora, alterando a vazão de produto coagulante de acordo com as características da água proveniente do sistema de captação. Para viabilizar a implementação do algoritmo *fuzzy* em um CLP de pequeno porte, foi utilizada a técnica desenvolvida em Braz e Viana (2015).

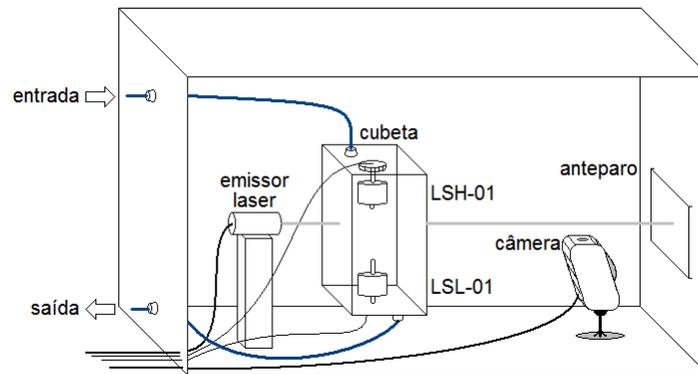
Como são o foco deste trabalho, o turbidímetro baseado em processamento de imagens e o controlador *fuzzy* para dosagem de produto coagulante são descritos de forma mais detalhada nos tópicos a seguir. No entanto, por serem extensos, os projetos elétrico e de *software* que especificam a construção e o funcionamento da planta piloto encontram-se no Apêndice A.

2.3 Medição de Turbidez por Processamento de Imagens

O turbidímetro baseado em processamento de imagens sugerido nas indicações de trabalhos futuros de Viana e Braga (2015) foi desenvolvido como protótipo no presente trabalho. Sua representação esquemática pode ser observada na Figura 4.3.

As chaves de nível (LC26M-40, ICOS) alto (LSH-01) e baixo (LSL-01) fornecem informações para que o fluxo de água no medidor seja controlado por meio de válvulas elétricas externas, permitindo sua utilização em sistemas automatizados, nos quais as amostras são preparadas, analisadas e descartadas ciclicamente. Por motivo de simplicidade, o emissor laser (IRL104A2B, Seeed Studios) permaneceu ligado durante todo o tempo de operação do medidor,

Figura 4.3 – Diagrama esquemático do medidor de turbidez desenvolvido: emissor laser, cubeta com chaves de nível alto e nível baixo (para permitir amostragens automáticas), câmera USB e anteparo; montagem em câmara escura de dimensões 33cm × 24cm × 10cm (comprimento × altura × profundidade).



Fonte: Do autor (2017).

sendo alimentado por uma fonte externa de eletricidade. A cubeta, formada por placas retangulares de policarbonato transparente, é preenchida com a água a ser analisada que, por sua vez, dispersa a luz que a atravessa em proporção direta à sua turbidez. A intensidade luminosa que atinge o anteparo é registrada pela câmera (1200, Labtec) e, ao final da etapa de aquisição de imagens, a amostra é descartada e o medidor fica em *standby*, aguardando o início de um novo ciclo.

A plataforma MATLAB[®] foi utilizada para o desenvolvimento e execução de uma sub-rotina que, entre outras tarefas, coordena a chamada das funções computacionais descritas em Viana e Braga (2015) e fornece valores de turbidez em unidade internacional (NTU), por meio dos seguintes passos:

1. Inicialização da câmera e configuração de seus circuitos eletrônicos, em que os recursos de compensação automática de luz e cálculo do tempo de exposição são desativados por meio de funções disponíveis na biblioteca “*Image Acquisition Toolbox*”, do próprio MATLAB[®];

2. Leitura via rede *ethernet* de um *flag* localizado na memória do CLP da planta piloto. Em nível lógico alto, este *flag* sinaliza que há uma amostra pronta para a análise na cubeta do medidor e esta sub-rotina segue para a próxima tarefa. Caso seu valor seja zero, a execução é desviada para o passo 9;
3. Captura e armazenamento de imagens que, respectivamente, baseiam-se nas funções “*getdata*” e “*imwrite*” (ambas disponíveis no MATLAB[®], sendo que a primeira pertence à biblioteca “*Data Acquisition Toolbox*” e a última nativa da própria plataforma);
4. Construção da matriz intermediária conhecida como THSP (do termo em inglês, *Time History of the Speckle Pattern*) a partir de um conjunto de 100 imagens capturadas no passo anterior, sendo que 1000 *pixels* da primeira imagem são selecionados de forma aleatória e acompanhados ao longo das demais 99 imagens;
5. Obtenção do valor que representa a intensidade luminosa da amostra. Como a tonalidade de cinza de cada *pixel* é representada por um escalar entre 0 (preto) e 255 (branco), essa tarefa consiste apenas em realizar a média aritmética dos valores associados aos 10^5 *pixels* da matriz THSP;
6. Conversão do valor obtido no passo anterior para o valor correspondente em NTU, que ocorre por meio de uma equação polinomial na qual este último é função do valor de intensidade luminosa (os coeficientes desta equação foram obtidos por meio do procedimento de calibração do medidor, descrito após este algoritmo);
7. Transferência, via rede *ethernet*, do valor apurado no passo anterior para a memória do Controlador Lógico-Programável (CLP) da planta piloto, para um endereço previamente alocado para recebê-lo;

8. Operação de *reset*, via rede *ethernet*, do *flag* que sinaliza a condição “amostra pronta para análise” (armazenado na memória do CLP e mencionado no passo 2);
9. A cada um segundo: leitura, inversão do nível lógico e escrita do resultado desta última operação na memória do CLP, gerando um sinal de pulsos (*lifelbit*) a ser monitorado por este último (caso as mudanças de nível lógico parem de ocorrer, o CLP restringe o funcionamento da planta piloto, uma vez que sua comunicação via rede *ethernet* com esta sub-rotina está inativa);
10. Caso não haja solicitação de cancelamento, reinicia-se no passo 2.

O procedimento de calibração do medidor, que possibilitou a obtenção de valores em NTU a partir dos dados fornecidos pelo processamento de imagens, consiste na determinação dos coeficientes de um polinômio que relaciona as duas escalas. Para tal, em uma etapa anterior à operação do medidor, cinco amostras com notórias diferenças de turbidez foram submetidas aos passos 3, 4 e 5 do procedimento anterior, sendo, em seguida, analisadas por um turbidímetro tradicional. Assim, a partir dos cinco pares de valores levantados, fez-se uma análise de regressão e determinou-se os coeficientes desejados.

2.4 Controlador Fuzzy para Dosagem de Produto Coagulante

Do ponto de vista operacional, o objetivo deste sistema de controle é determinar a intensidade de trabalho da bomba dosadora de acordo com as características da água proveniente do sistema de captação. Para tal, o controlador foi projetado para considerar duas entradas. A primeira recebe valores que expressam a vazão da água captada e que podem variar entre 0 e 1200 mL min⁻¹. A segunda entrada foi preparada para receber os valores de turbidez fornecidos pelo medidor proposto, em uma faixa entre 0 e 100 NTU. Por sua vez, a saída

do controlador é a vazão de produto coagulante considerada como ideal para a situação apresentada em suas entradas, neste caso, configurada para assumir valores entre 0 e 200 mL min⁻¹.

Dessa forma, os conjuntos *fuzzy* que cobrem os universos de discurso dessas variáveis foram definidos conforme mostrado na Tabela 4.1, em que as colunas *a*, *b* e *c* contêm os valores que formam funções de pertinência triangulares, cujos vértices são (*a*, 0), (*b*, 1) e (*c*, 0). Para os casos em que a coluna *d* é utilizada, os valores definem conjuntos trapezoidais de vértices (*a*, 0), (*b*, 1), (*c*, 1) e (*d*, 0).

Tabela 4.1 – Variáveis de entrada e saída do controlador e os conjuntos *fuzzy* que cobrem seus respectivos universos de discurso. Para as funções de pertinência triangulares, as colunas *a*, *b* e *c* contêm os valores que formam os vértices (*a*, 0), (*b*, 1) e (*c*, 0). Para os casos em que a coluna *d* é utilizada, os valores definem conjuntos trapezoidais de vértices (*a*, 0), (*b*, 1), (*c*, 1) e (*d*, 0).

Variável	Conjunto	a	b	c	d
F_{IN}	Bxa	0	600	800	
	Med	600	800	1000	
	Alt	800	1000	1200	1200
T_{IN}	Bxa	0	39	51	
	Med	39	51	59	
	Alt	51	59	100	100
F_{OUT}	MBx	0	0	50	
	Bxa	0	50	100	
	Med	50	100	150	
	Alt	100	150	200	
	MAt	150	200	200	

F_{IN} : vazão total da água produzida pela captação [mL min⁻¹]

T_{IN} : turbidez da água produzida pela captação [NTU]

F_{OUT} : vazão calculada de produto coagulante [mL min⁻¹]

Fonte: Do autor (2017).

As 9 regras utilizadas para estabelecer o comportamento do controlador são mostradas a seguir, sendo que a operação “E” foi definida como o produto das pertinências de cada variável em relação ao seu respectivo conjunto.

1. SE $F_{IN} = Bxa$ E $T_{IN} = Bxa$ ENTÃO $F_{OUT} = MBx$
2. SE $F_{IN} = Bxa$ E $T_{IN} = Med$ ENTÃO $F_{OUT} = Bxa$
3. SE $F_{IN} = Bxa$ E $T_{IN} = Alt$ ENTÃO $F_{OUT} = Med$
4. SE $F_{IN} = Med$ E $T_{IN} = Bxa$ ENTÃO $F_{OUT} = Bxa$
5. SE $F_{IN} = Med$ E $T_{IN} = Med$ ENTÃO $F_{OUT} = Med$
6. SE $F_{IN} = Med$ E $T_{IN} = Alt$ ENTÃO $F_{OUT} = Alt$
7. SE $F_{IN} = Alt$ E $T_{IN} = Bxa$ ENTÃO $F_{OUT} = Med$
8. SE $F_{IN} = Alt$ E $T_{IN} = Med$ ENTÃO $F_{OUT} = Alt$
9. SE $F_{IN} = Alt$ E $T_{IN} = Alt$ ENTÃO $F_{OUT} = MA$

Dessa maneira, por meio da técnica desenvolvida em Braz e Viana (2015), que permite a implementação de controladores *fuzzy* em CLPs de pequeno porte, a vazão de produto coagulante calculada por este controlador foi utilizada para reger o comportamento da bomba dosadora. O diagrama de interligação elétrica entre este atuador e o CLP pode ser encontrado no Apêndice A.

2.5 Amostras e Procedimento Experimental

A composição e o volume das soluções utilizadas em cada um dos três ensaios conduzidos foram as seguintes:

- Água clara – 35 L de água, sem adição de qualquer substância;
- Água escura – 35 L de água, nos quais a quantidade de terra necessária para produzir uma turbidez de 100 NTU foi gradualmente dissolvida;
- Produto coagulante – 15L de água, sem adição de qualquer substância (como o experimento se limitou à etapa de coagulação dos processos de tratamento de água, nenhum agente coagulante foi efetivamente utilizado).

E o procedimento experimental adotado foi:

1. Climatização do local do experimento em 22 °C;
2. Ativação do emissor laser do medidor proposto, impondo um mínimo de 30 minutos de funcionamento antes do primeiro ensaio;
3. Calibração do medidor proposto de acordo com o procedimento descrito anteriormente;
4. Limpeza dos recipientes de água clara, água escura e produto coagulante;
5. Preparação das amostras, conforme descrição anterior;
6. Ativação dos módulos de captação de água, amostragem automática e dosagem de produto coagulante da planta piloto;
7. Após o término de um ensaio, reinício no passo 4, até que os três ensaios planejados sejam realizados.

2.6 Acompanhamento das Medições de Turbidez

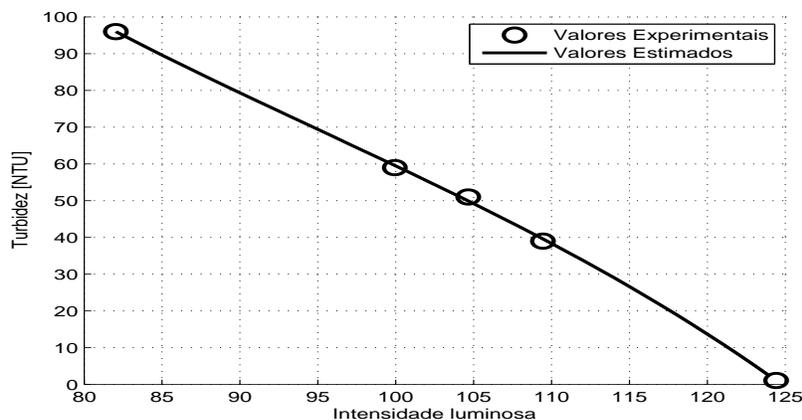
Um turbidímetro comercial (TB-1000, MS TECNOPON Instrumentação) foi utilizado para acompanhar os resultados fornecidos pelo medidor proposto. Para tal, após o escoamento que ocorre ao fim do ciclo de amostragem que o sistema de automação realiza para este último, todas as amostras foram interceptadas antes de atingirem o reservatório de descarte e submetidas a uma nova análise, realizada com uso do primeiro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desempenho do Medidor de Turbidez

Conforme o previsto, a calibração do medidor proposto foi realizada uma única vez, antes dos três ensaios experimentais. Os valores de intensidade luminosa, fornecidos pelo protótipo durante este procedimento, e os valores de turbidez, fornecidos pelo medidor comercial, podem ser observados na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Representação cartesiana da correspondência entre valores de intensidade luminosa e valores de turbidez. Os pontos apresentam os resultados das análises das cinco amostras de calibração. A linha representa os valores de turbidez fornecidos pelo polinômio de conversão em função dos valores de intensidade luminosa contidos no intervalo de interesse.



Fonte: Do autor (2017).

Por meio de uma análise de regressão realizada a partir dos cinco pares de valores decorrentes do procedimento de avaliação das amostras de calibração, o seguinte polinômio foi obtido, com coeficiente de determinação $R^2 = 99,9\%$ ³:

$$T = -0,0004 \cdot I^3 + 0,1141 \cdot I^2 - 12,8369 \cdot I + 601,7763 \quad (4.1)$$

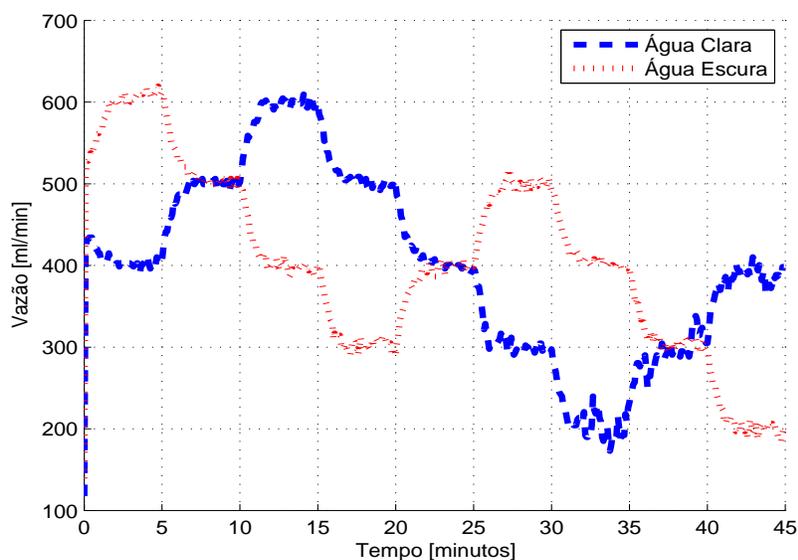
em que T é o valor de turbidez em NTU e I a intensidade luminosa.

³ Caso a reta $T = -2,2244 \cdot I + 280,7791$ fosse utilizada, este valor não seria alterado.

Além do mapeamento representado pela linha sólida que aparece na Figura 4.4, todos os valores de intensidade luminosa obtidos a partir deste ponto foram convertidos para NTU por meio da Equação 4.1. Dessa forma, é interessante notar que, com este procedimento de calibração, o protótipo foi ajustado para uma faixa de medição entre 1 e 96 NTU.

Em sequência, a planta piloto foi acionada e as vazões de água clara e água escura produzidas pelo sistema de captação durante o ensaio referente à primeira repetição do experimento podem ser observadas na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Vazões produzidas pelas bombas de água clara (linha tracejada) e água escura (linha pontilhada) ao longo dos 45 minutos do ensaio referente à primeira repetição do experimento realizado.



Fonte: Do autor (2017).

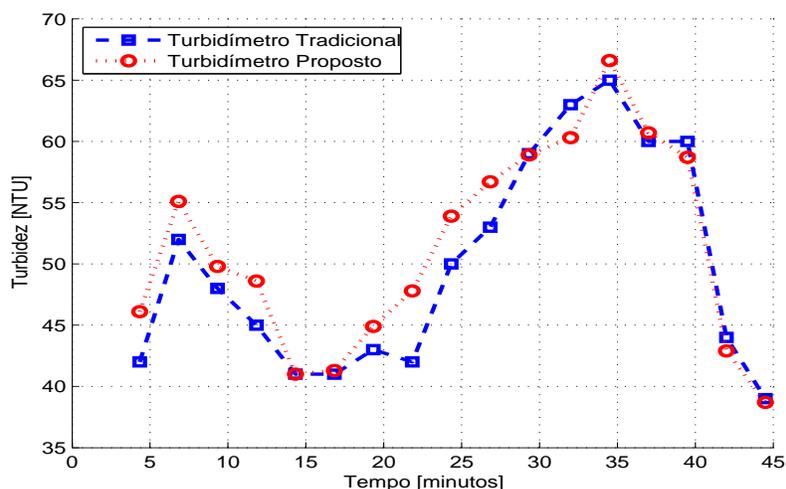
É possível notar que os controladores PI de vazão cumpriram seu papel, realizando transições a cada cinco minutos, de forma a impor as nove situações planejadas, sendo que estas podem ser agrupadas nas três etapas descritas a seguir.

- Período entre 0 e 15 minutos – No decorrer desta etapa, a soma das vazões foi mantida em seu maior valor, permanecendo em torno de 1000 mL min^{-1} . A mistura das águas clara e escura foi projetada de forma que a turbidez fosse decrescente, uma vez a vazão de água escura passou pelos patamares 600, 500 e 400 mL min^{-1} e a vazão de água clara realizou a sequência inversa.
- Período entre 15 e 30 minutos – Nesta etapa, em que a soma das vazões foi mantida em um valor intermediário (800 mL min^{-1}), espera-se que a turbidez apresente um comportamento ascendente, visto que a vazão de água escura partiu de 300 mL min^{-1} , foi para 400 mL min^{-1} e terminou em 500 mL min^{-1} , enquanto a vazão de água clara novamente realizou o oposto. Além disso, é interessante notar que, ao fim desta etapa, a turbidez deve atingir valores superiores aos da etapa anterior, visto que a proporção de água escura em relação à água clara foi a maior até o momento.
- Período entre 30 e 45 minutos – Durante esta etapa, a soma das vazões foi mantida em seu menor valor (600 mL min^{-1}) e os desbalanceamentos impostos foram proporcionalmente maiores. Assim, entre os minutos 30 e 35, quando a vazão de água escura estava em torno de 400 mL min^{-1} , espera-se que a turbidez continue em comportamento ascendente. Em seguida, quando a vazão da água escura foi reduzida para 300 mL min^{-1} e finalmente para 200 mL min^{-1} , a turbidez deve cair bruscamente, atingindo seu menor valor ao final dos 45 minutos do ensaio, uma vez a vazão de água clara novamente realizou a sequência inversa.

Atendendo a todas essas expectativas, os valores de turbidez mensurados, tanto com o turbidímetro tradicional como com o protótipo, podem ser observados na Figura 4.6. Conforme esperado, pode-se notar que existe um atraso de aproximadamente 2 minutos entre os eventos de transição das vazões e seus

reflexos na turbidez. Tal fato se deve ao tempo que as transições levaram para se concretizar e à dinâmica que ocorreu no recipiente misturador (que armazena um volume de 700 mL).

Figura 4.6 – Valores de Turbidez obtidos por meio do turbidímetro tradicional (quadrados interpolados por linha tracejada) e os fornecidos pelo turbidímetro proposto (círculos interpolados por linha pontilhada). As marcações representam os valores obtidos nos instantes de amostragem e as linhas apenas fornecem uma estimativa de comportamento em momentos intermediários.



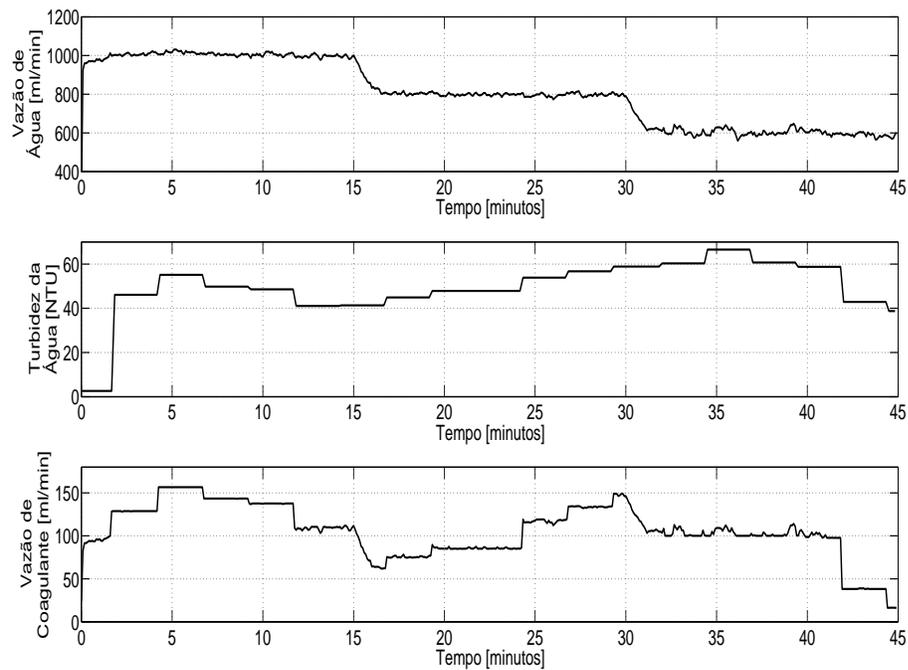
Fonte: Do autor (2017).

Comparando os resultados fornecidos pelos dois medidores de turbidez, o erro absoluto médio foi de 2,12 NTU. Nas duas outras repetições, os valores foram respectivamente 2,23 NTU e 1,67 NTU. Considerando que o turbidímetro tradicional possui uma precisão de 2% e que assim uma parcela destes desvios está associada a este último aparelho, pode-se destacar que o turbidímetro baseado em processamento de imagens apresentou um desempenho que atesta sua confiabilidade. Como o levantamento de suas características, como faixa de medição, precisão, exatidão e repetibilidade não figura entre os objetivos propostos, sugere-se que tal tarefa seja realizada em um trabalho futuro.

3.2 Desempenho do Controlador Fuzzy

A Figura 4.7 mostra os sinais recebidos nas duas entradas do controlador *fuzzy* e o sinal produzido em sua saída durante o ensaio referente à primeira repetição do experimento. O primeiro e o segundo sinal representam, respectivamente, a vazão total e a turbidez da água proveniente do sistema de captação. O terceiro sinal é a vazão de produto coagulante, calculada pelo controlador e enviada como referência para a bomba dosadora.

Figura 4.7 – Sinais relacionados ao controlador *fuzzy*: 1) fluxo de água na entrada do sistema de tratamento, obtido por meio da soma das vazões das bombas de captação e aplicado à primeira entrada do controlador; 2) turbidez da água na entrada do sistema de tratamento, fornecido pelo medidor proposto e aplicado à segunda entrada do controlador; 3) vazão de produto coagulante, coletada na saída do controlador e transferida para a bomba dosadora.



Conforme pode ser observado na Figura 4.7, o fluxo de água na entrada do sistema de tratamento, obtido por meio da soma das vazões das bombas de captação, permaneceu durante grande parte do ensaio em torno de um dos três patamares discutidos no tópico anterior: 1000, 800 e 600 mL min⁻¹. Dessa forma, estes patamares podem ser convenientemente utilizados como referência para a análise do comportamento do controlador *fuzzy*, dividindo os 45 minutos do ensaio em questão nas três etapas descritas a seguir. Além disso, é importante destacar que os valores de turbidez transferidos para a segunda entrada do controlador *fuzzy* foram os fornecidos pelo medidor proposto e previamente apresentados na Figura 4.6. A diferença em relação ao formato da curva apresentada na Figura 4.7 se deve ao fato de que, para o controlador, a turbidez foi mantida em seu último valor até que uma nova amostra fosse avaliada.

- Período entre 0 e 15 minutos – Nesta etapa do funcionamento da planta piloto a vazão na entrada do sistema de tratamento permaneceu em torno de 1000 mL min⁻¹, sendo classificada pelo controlador *fuzzy* como “alta”. Por sua vez, após a primeira amostragem, que ocorreu aproximadamente aos dois minutos, a turbidez aumentou até 55 NTU, levando o controlador a solicitar uma vazão de produto coagulante superior a 150 mL min⁻¹, definida em sua configuração como sendo “alta”. Em seguida, a turbidez decresceu até 41 NTU, possuindo elevada pertinência em relação ao conjunto “baixa”. Nesta situação, como a vazão de entrada estava “alta” e a turbidez estava “baixa”, a vazão de produto coagulante foi mantida em um valor “médio”, ou conforme projetado, em torno de 100 mL min⁻¹. É interessante notar que, como a vazão de água foi constante, as variações na vazão de produto coagulante corresponderam às variações de turbidez, evidenciando a coerência do controlador *fuzzy*.
- Período entre 15 e 30 minutos – Durante esta etapa, a turbidez apresentou sucessivas elevações, partindo de 41 NTU, quando foi classificada como

“baixa”, até atingir 57 NTU, quando foi classificada como “alta”. Entre o 15^o e o 17^o minuto do ensaio, a vazão na entrada do sistema de tratamento sofreu uma transição de 1000 para 800 mL min⁻¹ e, como a turbidez não foi atualizada, a vazão de produto coagulante também decaiu. Em seguida, no momento que a vazão de entrada foi estabilizada, uma nova medição de turbidez causou a elevação da vazão de saída. A partir desse momento, de forma similar ao que ocorreu na etapa anterior, a vazão de produto coagulante seguiu as elevações da turbidez, até que, por volta do 29^o minuto, a condição caracterizada por vazão de entrada “média” e turbidez “alta” se concretizou, fazendo que o controlador solicitasse uma vazão de saída “alta”, o que corresponde a 150 mL min⁻¹ de produto coagulante.

- Período entre 30 e 45 minutos – Novamente, após o início da etapa, a vazão produzida pelas bombas de captação levou aproximadamente dois minutos para realizar a transição entre os patamares planejados, neste caso, partindo de 800 e se estabilizando em 600 mL min⁻¹. E, da mesma forma, a vazão de produto coagulante acompanhou este decaimento, visto que a turbidez não foi atualizada durante este período. Após a mencionada transição, a vazão de entrada permaneceu em torno de seu patamar até o término do ensaio. Por sua vez, a vazão de saída apresentou um comportamento semelhante, porém apenas até o 42^o minuto, quando duas sucessivas quedas na turbidez levaram-na a valores mais baixos. É interessante notar que, o pico de turbidez que ocorreu entre o 34^o e 37^o minuto foi rejeitado pelo controlador *fuzzy*, simplesmente porque, nos momentos anteriores e posteriores a esta ocorrência, a turbidez já estava classificada como “alta”, sendo que este evento foi naturalmente tratado como uma saturação.

Diante dessas análises, verifica-se que o controlador *fuzzy* implementado no CLP de pequeno porte produziu respostas coerentes em todas as situações que lhe foram apresentadas, executando as operações previstas em um sistema

fuzzy de forma correta e eficiente. Por se tratar de um *software* que segue regras bem definidas para calcular a vazão de produto coagulante em função dos valores de vazão e de turbidez da água proveniente do sistema de captação, os resultados obtidos nos ensaios referentes às demais repetições do experimento foram igualmente coerentes.

3.3 Desempenho Geral do Sistema

O sistema de dosagem automática de produto coagulante funcionou conforme esperado. A calibração do turbidímetro proposto foi realizada por meio de um procedimento simples e que foi executado apenas uma vez, permanecendo válida e aparentemente inalterada durante as três repetições do experimento.

Além do uso de componentes de baixo custo, o medidor proposto possui a vantagem de naturalmente fornecer um sinal digital para o controlador, ou seja, os valores apurados por meio do processamento de imagens foram transferidos para a memória do controlador via rede de dados. Em muitos casos, os medidores comerciais enviam seus resultados aos controladores por meio de sinais elétricos analógicos, elevando suas imprecisões e expondo-os a interferências eletromagnéticas.

Com base nos desvios médios quadráticos obtidos com as comparações entre o medidor tradicional e o turbidímetro proposto, acredita-se que este último, após ter suas características de medição levantadas, poderá ser instalado em um processo de tratamento de água real. Em um primeiro momento, sugere-se que sua função seja apenas de monitoração da turbidez e posteriormente, uma vez comprovada sua robustez, que ocorra sua integração em um sistema de dosagem automática de produto coagulante.

Uma vez que os CLPs são os controladores mais utilizados nos sistemas de automação das estações de tratamento de água (LIBÂNIO, 2010, p. 143), destaca-se que o algoritmo *fuzzy* destinado ao controle de vazão de produto coagulante

da planta piloto pode ser adaptado para ETAs de qualquer porte, bastando que as definições dos conjuntos *fuzzy* sejam alteradas de acordo com os valores de vazão e turbidez adequados para cada situação.

Por fim, deve-se considerar que a planta piloto desenvolvida pode ser aproveitada em trabalhos futuros. Seu sistema de captação, por exemplo, permitiu que as vazões de água clara e água escura fossem bombeadas de forma padronizada, permanecendo em torno dos valores desejados que, por sua vez, foram alterados automaticamente conforme configurações prévias. Isto permite impor diferentes situações ao processo que se deseja avaliar, além de minimizar variações entre as repetições do experimento.

4 CONCLUSÃO

Utilizando bombas elétricas para drenar os reservatórios de água clara e água escura da planta piloto, seu sistema de automação foi capaz de impor mudanças nas características de vazão e turbidez da água bombeada para um suposto processo de potabilização e de reproduzir os comportamentos desejados em três repetições de um mesmo tipo de ensaio.

Cada ensaio durou 45 minutos, com a turbidez variando entre 35 e 70 NTU, sendo que as 18 amostras analisadas com o medidor proposto ao longo deste tempo foram, em seguida, avaliadas por um turbidímetro tradicional. O maior erro absoluto médio foi de 2,23 NTU, a partir das comparações realizadas no segundo ensaio. Considerando que o turbidímetro tradicional foi responsável por uma parcela deste erro, pois possui precisão de 2 %, pode-se concluir que o turbidímetro baseado em processamento de imagens apresentou um desempenho que atesta sua confiabilidade.

Com relação ao sistema automático de dosagem de produto coagulante, verificou-se que o controlador *fuzzy* produziu respostas coerentes em todas as situações criadas pela combinação de diferentes valores de vazão e turbidez que lhe foram apresentadas.

BIBLIOGRAFIA

BELISÁRIO, M. et al. O emprego de resíduos naturais no tratamento de efluentes contaminados com fármacos poluentes. **Revista Científica Internacional**, v. 10, p. 1–13, 2009.

BRAZ, P. H. A.; VIANA, D. C. Implementação de controladores fuzzy em CLPs de pequeno porte. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI). [S.l.: s.n.], 2015.

BURLINGAME, G. A.; PICKEL, M. J.; ROMAN, J. T. Practical applications of turbidity monitoring. **American Water Works Association. Journal**, v. 90, p. 57, 1998.

CHEN, C.-L.; HOU, P.-L. Fuzzy model identification and control system design for coagulation chemical dosing of potable water. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 6, p. 97–104, 2006.

CHEN, F.; PELDSZUS, S. et al. Pilot-scale investigation of drinking water ultrafiltration membrane fouling rates using advanced data analysis techniques. **Water Research**, v. 48, p. 508–518, 2014.

GARCÍA-VAQUERO, N. et al. Comparison of drinking water pollutant removal using a nanofiltration pilot plant powered by renewable energy and a conventional treatment facility. **Desalination**, v. 347, p. 94–102, 2014.

KELLEY, C. D. et al. An Affordable Open-Source Turbidimeter. **Sensors**, v. 14, p. 7142–7155, 2014.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. [S.l.]: Átomo, 2010. p. 496. ISBN 9788576701651.

NAM, S. W. et al. Streaming current titration for coagulation of high turbidity water. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 419, p. 133–139, 2013.

SHANNON, M. A. et al. Science and technology for water purification in the coming decades. **Nature**, v. 452, p. 301–310, 2008.

TIWARI, M. K.; ADAMOWSKI, J. Urban water demand forecasting and uncertainty assessment using ensemble wavelet-bootstrap-neural network models. **Water Resources Research**, v. 49, p. 6486–6507, 2013.

VIANA, D. C.; BRAGA, R. A. Turbidímetro de baixo custo baseado em processamento de imagens. In: JUBILEU de Ouro da SBEA. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 9788564681101.

WU, G.-D.; LO, S.-L. Predicting real-time coagulant dosage in water treatment by artificial neural networks and adaptive network-based fuzzy inference system. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 21, p. 1189–1195, 2008.

YU, R. F. et al. Application of pH-ORP titration to dynamically control the chlorination and dechlorination for wastewater reclamation. **Desalination**, v. 244, p. 164–176, 2009.

**CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO
DO BIOSPECKLE PARA
MONITORAÇÃO DA
DESINFECÇÃO DE ÁGUAS
RESIDUAIS SUBMETIDAS A
CLORAÇÃO¹**

¹ Este capítulo é uma versão traduzida do artigo elaborado por Viana, Pires e Braga (2017) durante o desenvolvimento desta Tese.

RESUMO

Apesar dos efeitos indesejados de seus subprodutos, como a formação de trihalometanos, a cloração é o método de desinfecção mais utilizado nas Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) em todo o mundo. Desta maneira, além de diminuir o custo laboral desta etapa do tratamento, a dosagem automática de produtos como o hipoclorito de cálcio pode aumentar sua eficiência, evitando desperdícios e reduzindo seus efeitos indesejados. Para tal, um controlador digital precisa ser constantemente alimentado com informações que o permitam estimar o potencial de desinfecção do processo, o que tradicionalmente ocorre por meio de medidores que aferem paralelamente o Potencial de Oxidação-Redução (ORP) e o pH da água em tratamento. Neste trabalho, a técnica conhecida como *biospeckle laser* foi investigada como alternativa para fundamentar as medições necessárias para um sistema automático de cloração, realizando a correlação entre o nível de atividade biológica e a presença/inativação de microrganismos em amostras de água coletadas após a etapa de filtração de uma ETE. Cinco tratamentos foram analisados por meio de dezesseis repetições e as respostas foram coerentes quando comparadas com as obtidas através de padrões já estabelecidos para este tipo de análise, evidenciando que a técnica investigada mostra-se viável para a monitoração de processos de desinfecção, sendo capaz de indicar se estes estão operando de forma satisfatória ou não.

1 INTRODUÇÃO

A coleta e o tratamento dos efluentes domésticos são importantes pilares do saneamento básico, contribuindo de forma significativa para a saúde de uma população e preservação do meio ambiente. Ao longo das últimas décadas, esta importância vem motivando o desenvolvimento de novos métodos de tratamento e a busca por melhorias dos já existentes (GATES; BORCHARDT, 1964; LEENTVAAR; WERUMEUS-BUNING; KOPPERS, 1978; KOBAYASHI; STENSTROM; MAH, 1983; GALAN; GROSSMANN, 1998; LIU; TAY, 2004; MICHAEL-KORDATOU et al., 2015). O tratamento de efluentes requer a implantação de sistemas que permitam que a água retorne à natureza com padrões mínimos de qualidade, sendo que tais sistemas podem assumir diversas configurações, variando entre os projetados para atuação pontual (MASSOUD; TARHINI; NASR, 2009) ou centralizada (ROSSO; STENSTROM; LARSON,

2008) e entre os que se baseiam em recursos naturais (VYMAZAL, 2011) ou tecnológicos (HAMITLON et al., 2006; DIEU, 2001).

Entre as diversas formas de se implementar um sistema de tratamento de efluentes, destacam-se os processos que aliam a decomposição biológica de matéria orgânica a procedimentos químicos e físicos de desinfecção. Como exemplo, pode-se mencionar os sistemas que, após a remoção de sólidos grosseiros e areia, utilizam uma sequência de etapas composta por Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente (UASBs), Filtros Biológicos Aerados Submersos (FBAs) e, para retirada de compostos em suspensão, decantadores ou filtros (CHERNICHARO, 2006). Existem casos em que a água resultante destas etapas pode apresentar reduções superiores a 90 % dos sólidos em suspensão e da demanda bioquímica de oxigênio (GONGALVES; ARAÚJO; CHERNICHARO, 1998). Ainda assim, para aprimorar sua qualidade, a água normalmente é submetida ao processo de desinfecção, que pode utilizar derivados do cloro, lâmpadas ultra-violeta, ozônio ou a combinação desses recursos.

Em geral, a desinfecção é a última etapa dos processos de tratamento de efluentes domésticos, sendo essencial para minimizar o lançamento de microrganismos patogênicos no ambiente e evitar a formação de possíveis vetores de transmissão de doenças. A ocorrência de microrganismos nas águas residuais tratadas é regulada por *guidelines* internacionais (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2006; UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; NATIONAL RISK MANAGEMENT RESEARCH LABORATORY; UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT, 2012) e, em alguns países, por normas específicas (ITÁLIA, 2003; BRASIL, 2005; ESPANHA, 2007). A maior parte das normas considera a incidência de coliformes termotolerantes como um indicador de agentes patogênicos, uma vez que a presença dessas bactérias no ambiente geralmente indica contaminação fecal (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2006).

Historicamente, a maioria das estações de tratamento utiliza a cloração como método de desinfecção (BLATCHLEY et al., 2007). O hipoclorito de cálcio, por exemplo, se mostra um eficiente limitador dos efeitos da matéria orgânica, dos sólidos em suspensão e dos microrganismos presentes nesta etapa do tratamento (PANT; MITTAL, 2007). No entanto, os subprodutos da cloração, originados nas reações entre o cloro e os compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água, trazem relevantes efeitos adversos (VOUKKALI; ZORPAS, 2015). Entre eles, devido ao seu potencial carcinogênico, os trihalometanos despertaram bastante interesse da comunidade científica ao longo das últimas décadas (REBHUN; HELLER-GROSSMAN; MANKA, 1997; YANG; SHANG; HUANG, 2005; MA et al., 2016).

Dessa forma, existe interesse em métodos alternativos de desinfecção, como a exposição da água à radiação ultravioleta, o uso de ozônio e outros (ACHER et al., 1997; LAZAROVA et al., 1999; JUNLI et al., 1997). No entanto, nenhum desses métodos é apontado como solução universal, sendo recomendados de acordo com as características de cada processo de tratamento: localização geográfica, tipo de efluente a ser tratado, padrões desejados para o produto final e outros (LEONG; KUO; TANG, 2008). Além disso, muitas vezes, existe a recomendação para que sejam usados em conjunto com a cloração (KOIVUNEN; HEINONEN-TANSKI, 2005). Sendo assim, o uso racional da cloração foi indicado como uma tendência para a desinfecção, uma vez que o controle eficiente da dosagem pode reduzir seus efeitos indesejados (HUA; YEATS, 2010).

O controle automático da cloração é um recurso que aumenta a eficiência do processo de desinfecção, reduzindo os gastos com produtos químicos e dispensando os operadores da planta de parte dos repetitivos trabalhos das análises laboratoriais (DIEU et al., 1995; YU, 2004). Neste sentido, geralmente, as primeiras tarefas são amostrar, em um ponto após a mistura, e medir o potencial de desinfecção dos produtos adicionados ao efluente, de forma que um controlador

digital possa comparar este potencial a um valor desejado, procurando minimizar a diferença entre eles por meio de um sinal de controle enviado ao elemento dosador. No entanto, a medição do potencial de desinfecção dos produtos adicionados em um determinado ponto do tratamento não é simples e, nos últimos anos, vem recebendo atenção, seja em avaliações comparativas de medidores comerciais, nas quais se destacaram os que utilizam o método do Potencial de Oxidação–Redução (ORP) (KOPCHYNSKI et al., 2001; WOOD et al., 2004); ou em pesquisas, na quais o acompanhamento do pH foi considerado fundamental para obtenção de bons resultados por meio deste último método (YU; CHEN et al., 2008; 2009), o que aumenta o custo do medidor.

Assim, a busca por estratégias de medição complementares é algo necessário, e os métodos ópticos apresentam potencial viabilidade, em particular com o uso de técnicas como a do *biospeckle laser* (BSL) (RABAL; BRAGA, 2008). Esta técnica, que permite a avaliação da atividade biológica em material orgânico por meio de processamento de imagens, é capaz de produzir resultados rápidos e confiáveis, como nos casos de análise de umidade (BRAGA JR.; HORGAN et al., 2007) e identificação de fungos (BRAGA JR.; RABELO et al., 2005) em sementes, monitoração da ação de bactérias em um meio controlado (MURIALDO et al., 2009), ou mesmo na avaliação da reação de parasitos ao contato com drogas destinadas a eliminá-los (POMARICO et al., 2004). A avaliação de atividade biológica em material orgânico está relacionada ao espalhamento do feixe de laser, causado pelos pequenos movimentos dos dispersores no material iluminado. A mudança de posição dos elementos dentro e fora das células é a fonte do efeito de ebulição no padrão de *speckle* e assim se dá sua ligação com a atividade biológica (RABAL; BRAGA, 2008), tal como o metabolismo de bactérias (MURIALDO et al., 2009) e parasitos (POMARICO et al., 2004). Portanto, a hipótese deste trabalho foi a de que a técnica do BSL é capaz de fornecer informações passíveis de serem convertidas em um sinal para

realimentar uma malha de controle de cloração de um sistema de tratamento de efluentes, sem a interferência ou julgamento humano.

Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi investigar a viabilidade do BSL como fonte de informação sobre o nível de contaminação de águas residuais em processo de desinfecção. Amostras coletadas em uma estação de tratamento de médio porte foram utilizadas para avaliar, por meio do método proposto, o efeito de diferentes dosagens de cloro e os resultados obtidos foram conferidos com o uso técnicas tradicionais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Amostras

Em todos os ensaios, as amostras de cada tratamento foram produzidas com volume final de 1 mL e diferentes concentrações de dois líquidos, chamados a partir desse ponto de: água secundária (coletada após a etapa de tratamento biológico de uma Estação de Tratamento de Efluentes) e produto desinfetante (solução de hipoclorito de sódio à 2,5 %). Além disso, amostras de água mineral provenientes de diferentes recipientes comercializados por uma mesma empresa foram utilizadas como controle negativo do experimento. Assim, o escopo dos tratamentos pode ser resumido por meio dos cinco grupos descritos a seguir.

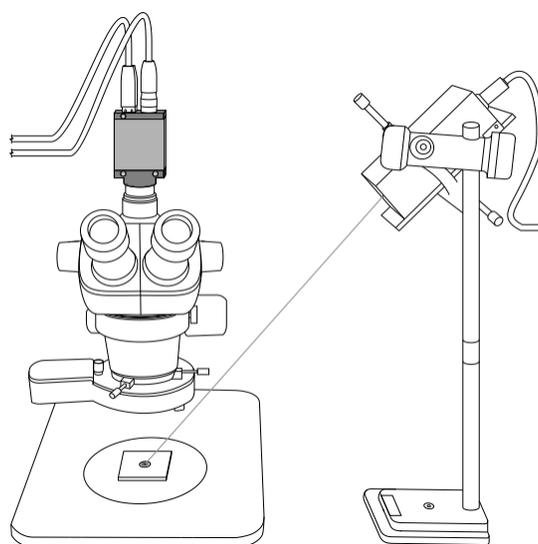
- A1 – Água secundária sem adição de produto desinfetante (controle positivo);
- A2 – Água secundária com 2 % de produto desinfetante (baixa concentração de cloro dissolvido);
- A3 – Água secundária com 10 % de produto desinfetante (mesma concentração de cloro dissolvido utilizada em Junli et al. (1997));
- A4 – Água secundária com 20 % de produto desinfetante (alta concentração de cloro dissolvido);
- A5 – Água mineral (controle negativo).

2.2 Aparato experimental

O aparato experimental baseou-se em um estereoscópio com câmera digital acoplada, no qual as amostras foram depositadas com o uso de uma placa de vidro despolido, de aproximadamente 4 mm de espessura e concavidade central com capacidade para 10 μ L. A lâmpada interna do estereoscópio foi mantida desligada, em detrimento ao uso de um emissor laser de 635 nm externo, apontado

diretamente para as amostras (Figura 5.1). Para evitar interferências de outras fontes luminosas, este aparato foi mantido dentro de uma câmara escura durante todo o experimento. A temperatura e a umidade relativa do ambiente foram respectivamente de 23,3°C e 61 % (valores médios obtidos a partir de medições anteriores e posteriores às sessões experimentais de cada repetição).

Figura 5.1 – Arranjo experimental composto por um emissor laser (*HeNe*), uma placa de vidro despolido (com concavidade central de 10 μ L) e estereoscópio com câmera digital (modelo Marlin F033C) acoplada.



Fonte: Do autor (2017).

A plataforma de desenvolvimento MATLAB[®] foi escolhida para a implementação de todas as sub-rotinas e funções computacionais² necessárias para a aquisição e processamento de imagens, permitindo a captura dos padrões de *speckle* dinâmico e a extração das informações que estes armazenam (RABAL; BRAGA, 2008).

² Disponíveis em <https://goo.gl/JKc981>

2.3 Aquisição e processamento de imagens

Após a confirmação do posicionamento de uma determinada amostra, 100 imagens de 320×240 *pixels* foram capturadas em intervalos de 33,3 ms e armazenadas em formato “*bitmap*”. Além desta sessão inicial de aquisição, disparada sempre dois minutos após a preparação da amostra, prosseguia-se com outras nove sessões em intervalos de dois minutos, totalizando 20 minutos de monitoramento de cada amostra.

Após a etapa de aquisição de imagens, a quantificação da atividade biológica foi realizada para cada conjunto de 100 imagens que representa uma determinada amostra em um determinado momento após o preparo. A primeira etapa do processamento foi a construção de uma matriz intermediária, conhecida como *Time History of the Speckle Pattern* (THSP), para cada um desses conjuntos. Com base no protocolo proposto em González-Peña et al. (2016), 10.000 *pixels* da primeira imagem de um determinado conjunto foram selecionados aleatoriamente e os valores que representam as intensidades luminosas desses *pixels* copiados para a primeira coluna da respectiva matriz THSP. Em sequência, preservando-se as coordenadas dos *pixels* selecionados, esta operação foi repetida para as demais imagens do conjunto, o que levou à matrizes THSP de dimensões 10.000×100 .

Posteriormente, para cada matriz THSP, a obtenção do valor que representa a atividade registrada pelas variações de intensidade dos *pixels* previamente selecionados foi realizada por meio do algoritmo *Absolute Value of Differences* (AVD), proposto em Braga et al. (2011). Basicamente, este algoritmo contabiliza as mudanças dos valores de intensidade armazenados nas linhas de uma matriz THSP, atribuindo um peso maior às mudanças mais bruscas e produzindo como resposta um valor escalar adimensional que, neste caso, está relacionado ao nível de atividade biológica registrado em um conjunto de imagens.

2.4 Análises estatísticas

Os resultados fornecidos pelo processamento de imagens foram, primeiramente, avaliados por meio de testes estatísticos. Para isso, foram realizadas 16 sessões experimentais (repetições), nas quais os cinco tratamentos descritos anteriormente foram analisados de acordo com o Delineamento de Blocos Casualizados. Este delineamento foi adotado para evitar que efeitos como uma possível variação de intensidade luminosa, causada pelo aquecimento do emissor laser, influenciassem os resultados de forma significativa.

O primeiro teste foi uma análise de variância, com a seguinte hipótese de nulidade: para um determinado momento após o preparo, não existe diferença entre os valores de atividade atribuídos às amostras pelo método proposto em função da concentração de produto desinfetante presente nas mesmas. Em seguida, a capacidade de diferenciação das amostras foi verificada por meio do teste de Scott–Knott (SCOTT; KNOTT, 1974; JELIHOVSCHI; FARIA; ALLAMAN, 2014). Em ambos os testes, o nível de significância adotado foi de 1 %.

Neste ponto, é importante notar que, como os tratamentos são quantitativos, o procedimento usualmente adotado após uma análise de variância é uma análise de regressão. No entanto, a adoção de um teste de médias se deu por dois motivos: 1) uma análise de regressão permitiria a obtenção de uma expressão matemática que forneceria o percentual de produto desinfetante de uma amostra em função do valor produzido pelo *biospeckle*. Durante a operação de uma estação de tratamento, este percentual seria utilizado para estimar se o nível de contaminação do efluente está abaixo do limite desejado. Dessa forma, uma vez que o valor fornecido pelo *biospeckle* está relacionado a este nível de contaminação de uma forma mais direta, há pouco interesse prático em se obter a referida expressão matemática; 2) no experimento realizado, a atividade biológica detectada com o *biospeckle* é função da população de microrganismos e da concentração de produto desinfetante de uma amostra. Assim, neste caso,

a expressão matemática obtida com uma análise de regressão seria válida apenas para uma população de microrganismos que permanecesse constante.

2.5 Validação por comparação com padrões estabelecidos

O procedimento para verificação da presença de coliformes totais e termotolerantes nas amostras foi realizado conforme recomendado em American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation (2012, p. 9.65-9.76). As estimativas de população foram obtidas por meio da Tabela do Número Mais Provável (NMP) e representam os valores encontrados em 100 mL ($\text{NMP } 100 \text{ mL}^{-1}$) de água.

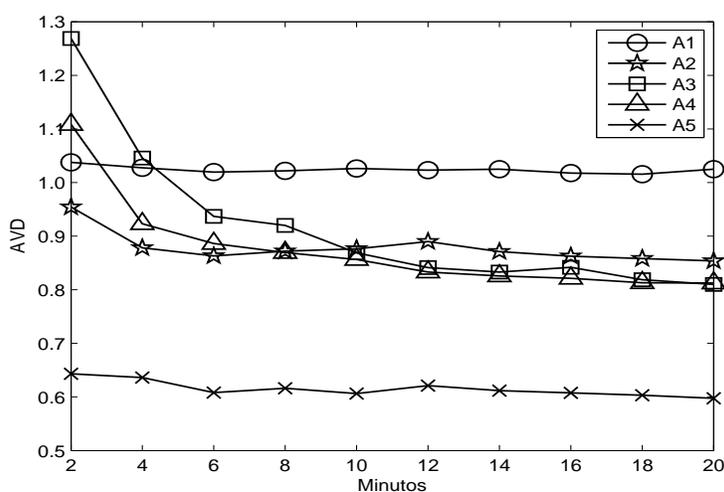
Os ensaios presuntivos foram realizados com três repetições de cada tratamento descrito no Item 2.1 (A1 a A5). Para cada uma das 15 amostras analisadas, após 14 minutos de sua preparação, foram realizadas três diluições decimais seriadas consecutivas utilizando-se como diluente Solução Salina Peptonada 0,1 % (0,1 % peptone, 0,85 % sodium chloride (w/v)). Cada uma dessas diluições foi realizada em triplicata, em tubos contendo Caldo Lauril Sulfato Triptose (Himedia), incubados a 35 °C por 24 horas, totalizando nove tubos por amostra.

Para as amostras que apresentaram turvação do meio de cultivo e formação de gás no interior do tubo de Durham (tubo de fermentação), procedeu-se aos testes confirmativos, transferindo-se uma alçada para dois tubos correspondentes: o primeiro, para estimativa de população de coliformes totais, contendo Caldo Verde Brilhante Lactose Bile (BGBB; Sigma–Aldrich), incubado a 35 °C por 24 horas; e o segundo, para estimativa de população de coliformes termotolerantes, contendo Caldo Escherichia coli (EC; Himedia), incubado em banho-maria com circulação de água, a 44,5 °C por 24 horas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5.2 mostra a média das respostas obtidas a partir de 16 repetições de um procedimento no qual a atividade presente em cada tratamento foi monitorada durante 20 minutos.

Figura 5.2 – Atividades detectadas nas amostras durante vinte minutos: média obtida com 16 repetições de cada categoria (A1 – água secundária sem adição de produto desinfetante; A2 – água secundária com 2 % de produto desinfetante; A3 – água secundária com 10 % de produto desinfetante; A4 – água secundária com 20 % de produto desinfetante; A5 – água mineral).



Fonte: Do autor (2017).

É possível notar a estabilidade das atividades encontradas nos tratamentos A1 (água secundária sem adição de produto desinfetante) e A5 (água mineral), sendo o patamar do primeiro mais elevado que o do último, conforme esperado. Por outro lado, as atividades atribuídas aos tratamentos que receberam produto desinfetante (A2, A3 e A4) apresentaram valores iniciais elevados, com decaimento acentuado nos primeiros minutos, com A2 tornando-se mais estável a partir do quarto minuto e A3 e A4 a partir do 12º minuto. A causa mais provável para este

comportamento transitório são as reações químicas que ocorrem quando o cloro entra em contato com os compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água (VOUKKALI; ZORPAS, 2015), influenciando a atividade registrada na superfície das amostras.

Para evitar análises comparativas em regimes transitórios, pode-se estabelecer um tempo de espera entre o momento em que ocorre a cloração e a análise de sua eficácia. Por exemplo, após verificar que todas as pressuposições para uma análise de variância foram atendidas, as atividades biológicas atribuídas às amostras 14 minutos após suas respectivas preparações foram submetidas a este procedimento estatístico. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.1 e na Figura 5.3, a qual reflete graficamente um coeficiente de variação de 6,82 %.

Tabela 5.1 – Análise de variância para a atividade detectada nas amostras no décimo quarto minuto após suas respectivas preparações.

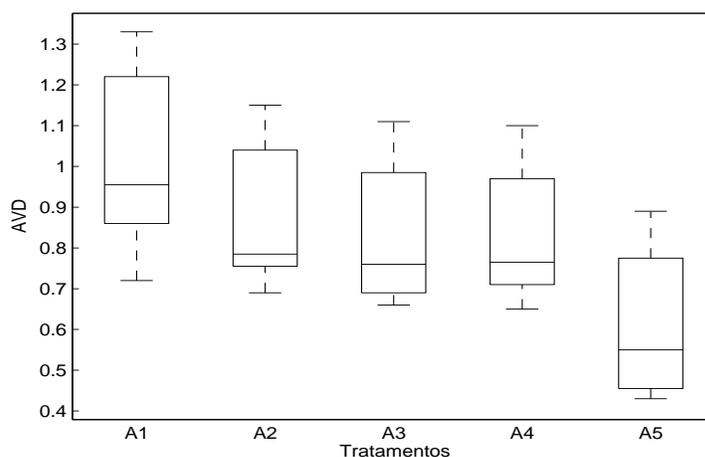
FV	GL	SQ	QM	<i>p</i>
Tratamentos	4	1,3964	0,3491	0,000**
Blocos	15	2,0547	0,1370	0,000**
Resíduos	60	0,1937	0,0032	
Totais	79	3,6448		

FV: fonte de variação; GL: grau de liberdade; SQ: soma dos quadrados;
QM: quadrado médio; **: significativo ($p < 0,01$).

Fonte: Do autor (2017).

Uma vez que os tratamentos foram uma fonte de variação significativa, deve-se rejeitar, ao nível de significância de 1 %, a hipótese de nulidade na qual se declara que não existe diferença entre os valores de atividade biológica em função da concentração de produto desinfetante nas amostras. Assim, com o objetivo de identificar quais tratamentos causaram efeitos estatisticamente diferentes na atividade biológica atribuída às amostras por meio do método proposto, o teste de Scott-Knott foi aplicado.

Figura 5.3 – Dispersão das atividades detectadas nas 16 amostras de cada categoria no décimo quarto minuto após suas respectivas preparações. Em cada caixa, a marca central é a mediana e as bordas são o 25º e 75º percentis. Os *whiskers* estendem-se até os valores mais extremos que não são considerados atípicos (*outliers*), os quais são marcados individualmente com o símbolo “+”.



Fonte: Do autor (2017).

Tabela 5.2 – Comparação de médias para as atividades detectadas pelo *biospeckle* (valores produzidos pelo algoritmo AVD) nas 16 amostras de cada categoria no décimo quarto minuto após suas respectivas preparações.

Categoria	AVD
A1	1,03 a
A2	0,87 b
A3	0,83 b
A4	0,83 b
A5	0,61 c

Valores seguidos pela mesma letra não possuem diferenças significativas ($p < 0,01$), de acordo com o teste de Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2017).

Como pode ser observado na Tabela 5.2, a água secundária sem adição de produto desinfetante, o conjunto formado pelas águas tratadas, com qualquer

concentração de produto desinfetante, e a água mineral diferiram estatisticamente entre si ao nível de 1 %.

Resultados similares foram encontrados para todas as seções de aquisição de imagens que ocorreram a partir do oitavo minuto. Os resultados obtidos no 14^o minuto foram apresentados em detalhe pois este foi o momento escolhido para se realizar os testes de validação, que ocorreram de acordo com a metodologia recomendada em American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation (2012, p. 9.65-9.76). Ao se proceder com o teste presuntivo previsto nesta metodologia, as amostras dos tratamentos A2 a A5 não apresentaram turvação do meio de cultivo, indicando ausência de coliformes e qualidade microbiológica satisfatória para reuso (BRASIL, 2005; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2006). A falta de crescimento microbiano observada nos tratamentos em que houve a adição de produto desinfetante (A2, A3 e A4) permite ainda inferir que as menores atividades em relação a A1, fornecidas pelo BSL no 14^o minuto do acompanhamento mostrado na Figura 5.2, estejam relacionadas à eficiência do processo de desinfecção e consequente inativação e/ou morte de microrganismos, resultante da adição de cloro (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999; HUA; RECKHOW, 2007).

Em contrapartida, 100 % dos tubos inoculados com água secundária sem adição de produto desinfetante (A1) apresentaram turvação do meio de cultivo e produção de gás, indicando a presença de microrganismos em todas as amostras deste tratamento, em um valor acima de $1,1 \times 10^4$ NMP 100 mL⁻¹, conforme resultados mostrados na Tabela 5.3.

Em complemento, procedeu-se com testes confirmativos para as amostras em que se detectou crescimento microbiano nos testes presuntivos. Após a transferência de alíquotas para os meios VBBL e EC, a formação de gás foi observada em pelo menos dois tubos das diluições 10^{-1} e 10^{-2} , indicando

Tabela 5.3 – Número Mais Provável (NMP) de coliformes por 100 mL de água secundária sem adição de produto desinfetante (categoria A1), para séries de 3 tubos com diluições de 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3} , de acordo com os testes presuntivos.

REPETIÇÃO	TUBOS POSITIVOS			NMP 100 mL ⁻¹	INTERVALO DE	
	NAS DILUIÇÕES				CONFIANÇA (95%)	
	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³		INFERIOR	SUPERIOR
R1	3	3	3	$> 1,1 \times 10^4$	420	--
R2	3	3	3	$> 1,1 \times 10^4$	420	--
R3	3	3	3	$> 1,1 \times 10^4$	420	--

Fonte: Do autor (2017).

resultados positivos para a presença de coliformes totais ($4,6 \times 10^2$ NMP 100 mL⁻¹) e termotolerantes ($2,1 \times 10^2$ NMP 100 mL⁻¹), conforme apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.5, respectivamente. Contudo, apesar de aproximadamente 40 % da contaminação observada ser composta por coliformes termotolerantes, a água secundária avaliada ofereceria baixo risco de disseminação de patógenos, de acordo com a legislação brasileira (BRASIL, 2005) e recomendações da Organização Mundial de Saúde (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2006).

Tabela 5.4 – Número Mais Provável (NMP) de coliformes por 100 mL de água secundária sem adição de produto desinfetante (categoria A1), para séries de 3 tubos com diluições de 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3} , de acordo com o teste para coliformes totais (VBBL).

REPETIÇÃO	TUBOS POSITIVOS			NMP 100 mL ⁻¹	INTERVALO DE	
	NAS DILUIÇÕES				CONFIANÇA (95%)	
	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³		INFERIOR	SUPERIOR
R1	3	3	1	$4,6 \times 10^2$	90	2000
R2	3	3	1	$4,6 \times 10^2$	90	2000
R3	3	3	1	$4,6 \times 10^2$	90	2000

Fonte: Do autor (2017).

Tabela 5.5 – Número Mais Provável (NMP) de coliformes por 100 mL de água secundária sem adição de produto desinfetante (categoria A1), para séries de 3 tubos com diluições de 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3} , de acordo com o teste para coliformes termotolerantes (EC).

REPETIÇÃO	TUBOS POSITIVOS			NMP 100 mL ⁻¹	INTERVALO DE	
	NAS DILUIÇÕES				CONFIANÇA (95%)	
	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³		INFERIOR	SUPERIOR
R1	3	2	0	$9,3 \times 10^1$	18	420
R2	3	2	2	$2,1 \times 10^2$	40	430
R3	3	2	2	$2,1 \times 10^2$	40	430

Fonte: Do autor (2017).

Os valores encontrados para o NMP de coliformes presentes em A1 demonstram que o BSL possui sensibilidade suficiente para a detecção de atividade microbiológica em amostras de água, até mesmo com concentrações mais baixas que as frequentemente encontradas em efluente bruto doméstico (VON SPERLING, 2005) e municipal (ABOU-ELELA; FAWZY; EL-GENDY, 2015), por exemplo. Assim, com base na coerência observada entre os resultados de NMP de coliformes e os fornecidos pelo método proposto, pode-se afirmar que é viável utilizar o BSL para detectar a presença de microrganismos ativos em amostras de água coletadas após a etapa de tratamento biológico de uma estação de tratamento de esgoto, uma vez que este método se apresentou confiável para separar amostras antes e após a cloração.

Como desvantagens, pode-se destacar que, de forma geral, o *biospeckle* é sensível à vibrações e à flutuações de luminosidade, que podem ser causadas por influências externas ou por mudanças na alimentação de dispositivos eletrônicos ou na posição dos elementos ópticos. Especificamente em relação ao problema estudado, a resposta adimensional do algoritmo AVD também pode ser considerada como uma desvantagem, pois não há um procedimento simples

para converter a atividade biológica detectada nas amostras em parâmetros usais, como concentração de produto desinfetante ou população de microrganismos, visto que o primeiro é dependente dos dois últimos. No entanto, respectivamente, essas desvantagens podem ser contornadas com a construção de um dispositivo de medição apropriado e com um procedimento de calibração baseado em um controle negativo, que pode fornecer valores percentuais de atividade biológica.

Dessa forma, com relação à viabilidade prática, pode-se vislumbrar aplicações do método proposto em dois cenários. No primeiro, como alternativa às análises laboratoriais, em que ocorre coleta manual das amostras, deve-se destacar que foi apresentado um protocolo robusto, que permite o uso de um estereoscópio amplamente difundido como principal estrutura para análise de amostras líquidas. No segundo cenário, como alternativa aos medidores baseados ORP em sistemas de automação, deve-se substituir o estereoscópio por uma estrutura compacta, associada a um mecanismo de amostragem cíclica, permitindo a monitoração de atividade biológica durante a cloração de efluentes em tratamento. Uma vez que o processamento de imagens fornece valores digitais, dispensando o uso de transdutores que enviam informação via sinal elétrico (0..10 V ou 4..20 mA), o disparo de mensagens de alarme ou mesmo a realimentação de uma bomba dosadora de produto desinfetante tornam-se tarefas que podem ser implementadas de forma simples.

4 CONCLUSÃO

As atividades biológicas presentes em dezesseis repetições dos cinco tratamentos estudados foram analisadas por meio do método proposto. De acordo com o teste de Scott–Knott, aplicado ao nível de significância de 1 %, três grupos diferiram estatisticamente entre si: água secundária sem adição de desinfetante, o conjunto formado pelas águas tratadas, com qualquer concentração de desinfetante, e água mineral. Testes de validação, realizados de acordo com procedimentos recomendados pela APHA, mostraram que o crescimento microbiológico ocorreu somente no primeiro grupo, evidenciando a capacidade do método proposto em separar amostras contaminadas das que foram desinfetadas. Este resultado abre caminho para a exploração prática deste método pois, com o uso de um mecanismo automático de amostragem, é possível utilizá-lo para fornecer dados que permitam a dosagem automática de produto desinfetante em estações de tratamento de efluentes, aumentando sua eficiência e reduzindo os indesejados efeitos dos subprodutos da desinfecção.

BIBLIOGRAFIA

ABOU-ELELA, S. I.; FAWZY, M. E.; EL-GENDY, A. S. Potential of using biological aerated filter as a post treatment for municipal wastewater. **Ecological Engineering**, v. 84, p. 53–57, 2015.

ACHER, A. et al. Ecologically friendly wastewater disinfection techniques. **Water Research**, v. 31, p. 1398–1404, 1997.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Edição: E. W. Rice e L. Bridgewater. [S.l.]: American Public Health Association (APHA), 2012. ISBN 9780875530130.

BLATCHLEY, E. R. et al. Effects of Wastewater Disinfection on Waterborne Bacteria and Viruses. **Water Environment Research**, v. 79, p. 81–92, 2007.

BRAGA JR., R. A.; HORGAN, G. W. et al. Biological feature isolation by wavelets in biospeckle laser images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 58, p. 123–132, 2007.

BRAGA JR., R. A.; RABELO, G. F. et al. Detection of Fungi in Beans by the Laser Biospeckle Technique. **Biosystems Engineering**, v. 91, p. 465–469, 2005.

BRAGA, R.A. et al. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences. **Optics Communications**, v. 284, p. 646–650, 2011. ISSN 0030-4018.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005**. Accessed: June 28, 2016. Conselho Nacional de Meio Ambiente. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>.

CHERNICHARO, C. A. L. Post-Treatment Options for the Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 5, p. 73–92, 2006.

DIEU, B. Application of the SCADA system in wastewater treatment plants. **ISA Transactions**, v. 40, p. 267–281, 2001.

DIEU, B. et al. Applications of automatic control systems for chlorination and dechlorination processes in wastewater treatment plants. **ISA Transactions**, v. 34, p. 21–28, 1995.

ESPAÑA. **Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre**. Accessed: June 28, 2016. Ministerio De La Presidencia. 2007. Disponible em: <<http://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf>>.

GALAN, B.; GROSSMANN, I. E. Optimal Design of Distributed Wastewater Treatment Networks. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 37, p. 4036–4048, 1998.

GATES, W. E.; BORCHARDT, J. A. Nitrogen and Phosphorus Extraction from Domestic Wastewater Treatment Plant Effluents by Controlled Algal Culture. **Water Pollution Control Federation**, v. 36, p. 443–462, 1964.

GONGALVES, R. F.; ARAÚJO, V. L.; CHERNICHARO, C. A. L. Association of a UASB reactor and a submerged aerated biofilter for domestic sewage treatment. **Water Science and Technology**, v. 38, p. 189–195, 1998.

GONZÁLEZ-PEÑA, R.J. et al. Assessment of biological activity in RAW 264.7 cell line stimulated with lipopolysaccharide using dynamic laser speckle. **Applied Physics B**, v. 122, p. 275, 2016.

HAMILTON, R. et al. Control issues and challenges in wastewater treatment plants. **IEEE Control Systems**, v. 26, p. 63–69, 2006.

HUA, G.; RECKHOW, D. A. Comparison of disinfection byproduct formation from chlorine and alternative disinfectants. **Water Research**, v. 41, p. 1667–1678, 2007.

HUA, G.; YEATS, S. Control of trihalomethanes in wastewater treatment. **Fla. Water Resour. Journal**, v. 4, p. 6–12, 2010.

ITÁLIA. **Decreto 12 giugno 2003, n. 185**. Accessed: June 28, 2016. Ministero Dell'ambiente E Della Tutela Del Territorio. 2003. Disponível em: <<http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2003/07/23/003G0210/sg>>.

JELIHOVSCHI, E.G.; FARIA, J.C.; ALLAMAN, I.B. ScottKnott: a package for performing the Scott-Knott clustering algorithm in R. **TEMA (São Carlos)**, v. 15, p. 3–17, 2014.

JUNLI, H. et al. Disinfection effect of chlorine dioxide on bacteria in water. **Water Research**, v. 31, p. 607–613, 1997.

KOBAYASHI, H.A.; STENSTROM, M.K.; MAH, R.A. Treatment of low strength domestic wastewater using the anaerobic filter. **Water Research**, v. 17, p. 903–909, 1983.

KOIVUNEN, J.; HEINONEN-TANSKI, H. Inactivation of enteric microorganisms with chemical disinfectants, UV irradiation and combined chemical/UV treatments. **Water Research**, v. 39, p. 1519–1526, 2005.

KOPCHYNSKI, D. M. et al. Comparisons of on-line orp and chlorine residual monitoring/control systems for wastewater treatment plant final effluent chlorination. **Proceedings of the Water Environment Federation**, v. 2001, p. 387–407, 2001.

LAZAROVA, V. et al. Advanced wastewater disinfection technologies: State of the art and perspectives. **Water Science and Technology**, v. 40, p. 203–213, 1999.

LEENTVAAR, J.; WERUMEUS-BUNING, W.G.; KOPPERS, H.M.M. Physico-chemical treatment of municipal wastewater. Coagulation-flocculation. **Water Research**, v. 12, p. 35–40, 1978.

LEONG, L. Y. C.; KUO, J.; TANG, C-C. **Disinfection of wastewater effluent: Comparison of alternative technologies**. [S.l.]: Water Environment Research Foundation, 2008.

LIU, Y.; TAY, J. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment. **Biotechnology Advances**, v. 22, p. 533–563, 2004.

MA, D. et al. C-, N-DBP formation and quantification by differential spectra in MBR treated municipal wastewater exposed to chlorine and chloramine. **Chemical Engineering Journal**, v. 291, p. 55–63, 2016.

MASSOUD, M. A.; TARHINI, A.; NASR, J. A. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. **Journal of Environmental Management**, v. 90, p. 652–659, 2009.

MICHAEL-KORDATOU, I. et al. Dissolved effluent organic matter: Characteristics and potential implications in wastewater treatment and reuse applications. **Water Research**, v. 77, p. 213–248, 2015.

MURIALDO, S. E. et al. Analysis of bacterial chemotactic response using dynamic laser speckle. **Journal of Biomedical Optics**, v. 14, p. 064015–064015, 2009.

PANT, A.; MITTAL, A. K. Disinfection of wastewater: Comparative evaluation of chlorination and DHS-biotower. **Journal of Environmental Biology**, v. 28, p. 717–722, 2007.

POMARICO, J. A. et al. Speckle interferometry applied to pharmacodynamic studies: evaluation of parasite motility. **European Biophysics Journal**, v. 33, p. 694–699, 2004.

RABAL, H. J.; BRAGA, R. A. **Dynamic Laser Speckle and Applications**. [S.l.]: CRC Press, 2008. ISBN 9781420060164.

REBHUN, M.; HELLER-GROSSMAN, L.; MANKA, J. Formation of Disinfection Byproducts during Chlorination of Secondary Effluent and Renovated Water. **Water Environment Research**, v. 69, p. 1154–1162, 1997.

ROSSO, D.; STENSTROM, M. K.; LARSON, L. E. Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art. **Water Science & Technology**, v. 57, p. 973–978, 2008.

SCOTT, A.J.; KNOTT, M. A Cluster Analysis Method for Grouping Means in the Analysis of Variance. **Biometrics**, v. 30, p. 507–512, 1974.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; NATIONAL RISK MANAGEMENT RESEARCH LABORATORY; UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT. **2012 Guidelines for Water Reuse**. [S.l.]: U.S. Environmental Protection Agency, 2012.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Wastewater Technology Fact Sheet Chlorine Disinfection**. Accessed: July 04, 2016. Office of Water. 1999. Disponível em: <<http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS45245>>.

VIANA, D. C.; PIRES, J. F.; BRAGA, R. A. Biospeckle laser technique applied for estimating disinfection accomplishment of wastewaters subjected to chlorination. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 109, p. 670–676, 2017.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. [S.l.]: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. v. 1.

VOUKKALI, I.; ZORPAS, A.A. Disinfection methods and by-products formation. **Desalination and Water Treatment**, v. 56, p. 1150–1161, 2015.

VYMAZAL, J. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. **Environmental Science & Technology**, v. 45, p. 61–69, 2011.

WOOD, P. J. et al. Evaluation of on-line chlorine analyzers for automated chlorination control. **Proceedings of the Water Environment Federation**, v. 2004, p. 147–170, 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater: Wastewater Use in Agriculture.** [S.l.]: World Health Organization, 2006. v. 2.

YANG, X.; SHANG, C.; HUANG, J.C. DBP formation in breakpoint chlorination of wastewater. **Water Research**, v. 39, p. 4755–4767, 2005.

YU, R. F. Feed–forward dose control of wastewater chlorination using on-line pH and ORP titration. **Chemosphere**, v. 56, p. 973–980, 2004.

YU, R. F.; CHEN, H. W. et al. Application of pH-ORP titration to dynamically control the chlorination and dechlorination for wastewater reclamation. **Desalination**, v. 244, p. 164–176, 2009.

_____. Dynamic control of disinfection for wastewater reuse applying ORP/pH monitoring and artificial neural networks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, p. 1015–1021, 2008.

CAPÍTULO 6 –
CONSIDERAÇÕES FINAIS

1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Em uma etapa preliminar aos esforços que geraram os resultados apresentados neste trabalho, uma série de rotinas e funções computacionais foi desenvolvida, a princípio, apenas para consolidar alguns conceitos relacionados ao vasto campo conhecido como “processamento de imagens”. Porém, sua organização modular se mostrou flexível e confiável o bastante para que todas as tarefas apresentadas no presente trabalho dispensassem qualquer outro tipo de ferramenta computacional, no que tange à aquisição e ao processamento das imagens utilizadas. Além disso, alguns conceitos propostos durante esta fase de desenvolvimento de *software* também foram aplicados em trabalhos paralelos, como a composição da matriz THSP por meio da seleção aleatória de *pixels*, apresentada em González-Peña et al. (2016) e Braga et al. (2017).

Outra contribuição que está relacionada ao desenvolvimento de *software* é representada pelo algoritmo proposto no Capítulo 3. Por permitir o balanceamento entre o tempo de atualização do sinal de saída de um sistema *fuzzy* e o seu custo computacional, este novo algoritmo possibilita a implementação desses sistemas em dispositivos com poder de processamento limitado, inclusive sem impedi-los de realizar outras tarefas de forma satisfatória. Neste trabalho, um CLP de pequeno porte (S7-1200) foi utilizado para executar duas codificações distintas deste algoritmo. Em um primeiro momento, o objetivo foi manter o nível de água em um tanque no patamar desejado e, na segunda aplicação, realizar a dosagem automática de produto coagulante a partir de informações de vazão e turbidez da água bombeada por um sistema de captação. No entanto, as potencialidades dos sistemas *fuzzy* já são amplamente conhecidas, cabendo destacar a eficiência do método desenvolvido para aplicá-las em dispositivos de baixo custo.

Com relação aos resultados já discutidos em outros pontos do trabalho, vale ressaltar que, por meio das etapas apresentadas nos Capítulos 2, 3 e 4, o objetivo de desenvolver uma metodologia óptica aplicável à medição de turbidez,

incluindo a montagem de um protótipo de medidor e a implementação de um sistema de dosagem automática de produto coagulante economicamente atrativo, foi atingido. Para tal, o protótipo de um turbidímetro baseado em processamento de imagens foi utilizado para fornecer informações a um CLP de pequeno porte que, por meio do sistema *fuzzy* já mencionado, calcula a quantidade ideal de produto coagulante a ser adicionada ao processo de potabilização em um determinado momento. A coerência deste sistema foi avaliada por meio de uma planta piloto e os resultados indicaram sua aptidão para funcionar em uma ETA real.

Por sua vez, a planta piloto desenvolvida para a mencionada avaliação também pode ser considerada como uma contribuição. Uma vez que seu sistema de captação permite configurar e aplicar de forma automática diferentes situações de vazão e turbidez aos elementos que se deseja avaliar, inclusive criando a possibilidade de se repetir ensaios de forma padronizada, diversos outros trabalhos podem se beneficiar desta estrutura.

Finalmente, o desenvolvimento de um método óptico que permite estimar se a desinfecção de efluentes em processo de tratamento está ocorrendo de forma satisfatória (ou não) também pode ser apontado como relevante. Neste caso, a técnica do *biospeckle* foi utilizada para avaliar a atividade biológica em amostras coletadas em uma ETE de médio porte, produzindo resultados coerentes com os fornecidos por padrões já consolidados para estimar populações de coliformes. A partir desta etapa, uma sequência de trabalho, similar à anterior, poderá resultar em um sistema automático para dosagem de produtos derivados do cloro.

2 PERSPECTIVAS

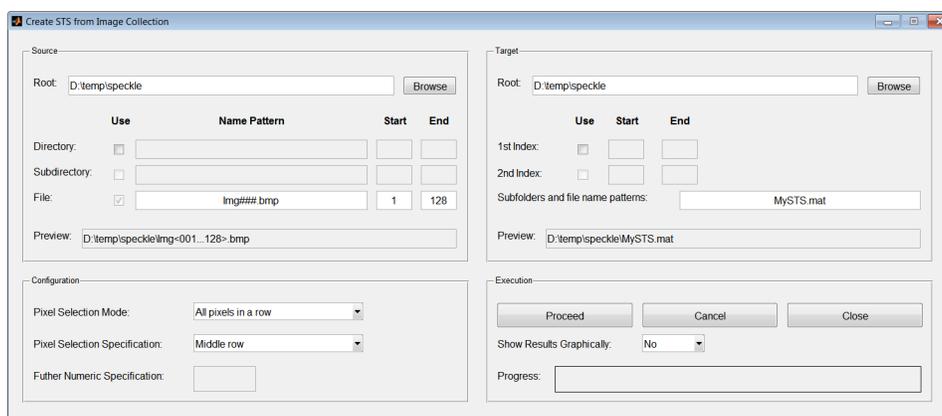
Os trabalhos registrados ao longo deste texto permitem que algumas direções de pesquisa sejam sugeridas como temas a serem explorados em novas investigações. A seguir, algumas perspectivas são apontadas, não por ordem de importância, mas de acordo com a sequência em que os tópicos aos quais estão relacionadas foram apresentados nos capítulos anteriores. A maioria delas já foi apontada nos devidos locais, mas são elaboradas aqui por questões de conveniência e organização do texto.

Conforme mencionado na seção anterior, todas as ferramentas necessárias para a aquisição e processamento das imagens utilizadas neste trabalho foram implementadas por este autor em uma etapa preliminar aos experimentos que levaram aos resultados aqui apresentados. No entanto, por não terem sido necessários, alguns métodos de análise relacionados ao *speckle* dinâmico, que inclusive podem ser observados no diagrama esquemático apresentado na Figura 1.10, não foram implementados. Como exemplo, pode-se citar os métodos do desvio padrão (NOTHDURFT; YAO, 2005) e o das diferenças generalizadas (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999), ambos para análise visual dos padrões de *speckle*. Dessa forma, com o objetivo de compor um conjunto de ferramentas que possa ser utilizado de forma mais geral, sugere-se que tais implementações sejam realizadas.

Além disso, é usual que o *speckle* dinâmico seja utilizado como ferramenta de análise por pesquisadores de diversas áreas, porém o uso de comandos textuais em um sistema computacional pode causar alguns transtornos ou mesmo implicar na necessidade de auxílio proveniente de pessoas especializadas em informática. De forma a minimizar tais situações, o desenvolvimento de interfaces intuitivas torna-se uma tarefa essencial. Um exemplo é a janela virtual apresentada na Figura 6.1, na qual uma interface para geração de uma ou mais matrizes THSP a partir de uma ou mais coleções de imagens pode ser observada. Esta janela foi desenvolvida

de forma experimental durante este trabalho, no entanto tarefas como aquisição de imagens, quantificação numérica da atividade registrada em uma matriz THSP, filtragem de uma matriz THSP no domínio da frequência, entre outras, poderiam ocorrer por meio de interfaces similares.

Figura 6.1 – Janela virtual que fornece uma interface gráfica para geração de uma ou mais matrizes THSP a partir de uma ou mais coleções de imagens.



Fonte: Do autor (2017).

Como a plataforma MATLAB[®] foi escolhida para as implementações já realizadas, incluindo a janela virtual apresentada na figura anterior, sugere-se que ela seja adotada para a continuidade desta tarefa, pelo menos até que o conjunto de ferramentas (ou *toolbox*) proposto seja consolidado. Porém, deve-se destacar que esta plataforma não é gratuita e, dessa forma, sua posterior substituição pode ser vantajosa. Algumas alternativas são as plataformas livres *Scilab* e *GNU Octave*, ou mesmo aquelas que utilizam linguagens de programação como *Visual Basic*, *Java* ou *Python*, sendo capazes de gerar um produto final que possa ser executado de maneira independente.

Com relação à avaliação de turbidez em amostras coletadas manualmente, os resultados obtidos no Capítulo 2 mostram que o processamento de imagens é uma técnica promissora, tanto para o desenvolvimento de aparelhos portáteis como para aparelhos de bancada. No primeiro caso, sugere-se que a câmera integrada

e o poder de processamento dos *smartphones* sejam utilizados para capturar e processar as imagens associadas a uma amostra. Dessa forma, deve-se desenvolver um acessório contendo um emissor laser e um receptor para o líquido a ser analisado, de forma que, uma vez acoplado ao dispositivo, permita avaliações *in loco*. Por meio de um acessório similar, incluindo-se apenas uma *webcam* tradicional, o poder de processamento dos PCs pode ser utilizado para viabilizar um medidor de bancada. Em ambos os casos, o procedimento de calibração, a execução das medições e a apresentação dos resultados, bem como a formação de históricos e a exportação destes, podem ocorrer por meio de interfaces gráficas amigáveis. Naturalmente, após a confecção dos protótipos, suas respectivas características de medição devem ser levantadas, incluindo a faixa de medição, a precisão, a exatidão, a resolução e a repetibilidade.

Em outra linha de atuação, o estudo e a aplicação de técnicas para redução do esforço de controle em sistemas *fuzzy* (LUCAS; SHAHMIRZADI; SHEIKHOLESLAMI, 2004) podem melhorar o resultado apresentado no Capítulo 3. Na Figura 3.4, pode-se observar as frequentes oscilações do sinal de saída do controlador, que neste caso foi uma referência de velocidade para a bomba de água que alimenta o tanque no qual o nível deve ser controlado. Caso um sinal similar fosse utilizado como referência para a abertura de uma válvula, o desgaste prematuro de suas partes mecânicas seria bastante provável.

Ainda em relação à implementação de sistemas *fuzzy* em CLPs de pequeno porte, a generalização de algumas funções computacionais desenvolvidas durante este trabalho pode ser apontada como uma frente de trabalho interessante. Apesar de não demandarem esforços significativos para que sejam adaptadas à outras situações, tais funções foram codificadas especificamente para os casos em que foram utilizadas: controle de nível e dosagem de produto coagulante. Dessa forma, pode-se sugerir que os universos de discurso, as funções de pertinência e o banco de conhecimento sejam configurados por meio de valores contidos em uma

determinada área de memória do CLP e que, posteriormente, possam ser alterados por meio de uma interface gráfica provida por um sistema supervisor.

Por sua vez, no que tange à avaliação automática de turbidez em processos de tratamento de água e aos sistemas de dosagem automática de produto coagulante, percebe-se que a atualização do protótipo desenvolvido, de forma a aproximá-lo de um produto comercial e do conceito de “medidor inteligente”, é uma tarefa promissora. Para tal, pode-se utilizar um microcontrolador (*arduino*, por exemplo) para realizar o processamento de imagens. Além disso, a partir de suas chaves de nível e de sinais que receberá via rede de dados, este microcontrolador pode ser usado para gerenciar a coleta de amostras, comandando as válvulas de admissão e escoamento do medidor. Em complemento, poderá enviar, também via rede, os resultados das medições e sinais de diagnóstico. Por meio de duas ou mais válvulas de admissão, um mesmo medidor pode ser usado para analisar a turbidez da água em diferentes pontos de um processo de tratamento. Além das válvulas de admissão conectadas ao processo, pode-se usar uma válvula suplementar para facilitar a introdução das amostras de calibração no medidor. Esta calibração pode ocorrer por meio de amostras de referência (cujos valores de turbidez são previamente conhecidos) ou, alternativamente, a água que escoar do medidor pode ser coletada e analisada por um aparelho de referência. Naturalmente, quando o medidor proposto estiver em regime de operação, este aparelho de referência também pode ser utilizado para a simples conferência de seus resultados.

Após sofrer estas atualizações, a nova versão do protótipo deverá passar por uma fase de testes preliminares, na qual seu funcionamento básico deve ser avaliado e suas características de medição (precisão, repetibilidade, etc) devem ser levantadas. Para tal, uma planta piloto, como a especificada no Apêndice A, pode ser útil. No entanto, com relação ao seu projeto elétrico, uma melhoria da qual se espera benefícios significativos consiste no uso de conversores baseados

em relés de estado sólido em detrimento dos circuitos eletrônicos empregados para compatibilizar as características elétricas do CLP com as de seus sensores e atuadores. Isso porque estes circuitos, ao se aquecerem, apresentaram alterações em suas características elétricas e, sendo assim, esta substituição tende a agregar robustez e confiabilidade ao sistema. Após a fase de testes preliminares, sugere-se que o protótipo de medidor seja instalado em um processo de tratamento de água real. Primeiramente, apenas para monitorar e registrar históricos da turbidez nos pontos de interesse e, posteriormente, para alimentar um controlador digital que possa fazer a dosagem de produto coagulante.

Por fim, com relação à detecção de atividade biológica em águas residuais, pode-se indicar como perspectiva o desenvolvimento de um mecanismo que permita a realização de medições cíclicas em um processo de tratamento. Similarmente ao que foi realizado para as medições de turbidez, este mecanismo deverá, automaticamente, coletar amostras, disponibilizá-las para análise e descartá-las. No entanto, neste caso, não há um procedimento simples para converter os valores de atividade biológica fornecidos pelo processamento de imagens em valores que expressam atributos mais usais, como a concentração de produto desinfetante ou a população de microrganismos, visto que a primeira depende dos dois últimos. Para remediar esta situação, sugere-se que, a cada ciclo, o medidor faça duas análises: uma da amostra coletada e outra de um líquido esterilizado, que servirá como controle negativo. Dessa forma, ao se relacionar os resultados, a atividade biológica poderá ser fornecida em escala percentual. Caso essas duas análises ocorram simultaneamente, problemas relacionados a vibrações externas e a flutuações de luminosidade, que podem interferir nos padrões de *speckle*, também podem ser minimizados.

BIBLIOGRAFIA

ARIZAGA, R.; TRIVI, M.; RABAL, H. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. **Optics Laser Technology**, v. 31, p. 163–169, 1999.

BRAGA, R.A. et al. Dynamic laser speckle analysed considering inhomogeneities in the biological sample. **Journal of Biomedics Optics**, In Press, 2017.

GONZÁLEZ-PEÑA, R.J. et al. Assessment of biological activity in RAW 264.7 cell line stimulated with lipopolysaccharide using dynamic laser speckle. **Applied Physics B**, v. 122, p. 275, 2016.

LUCAS, C.; SHAHMIRZADI, D.; SHEIKHOLESAMI, N. Introducing BELBIC: brain emotional learning based intelligent controller. **Intelligent Automation & Soft Computing**, v. 10, p. 11–21, 2004.

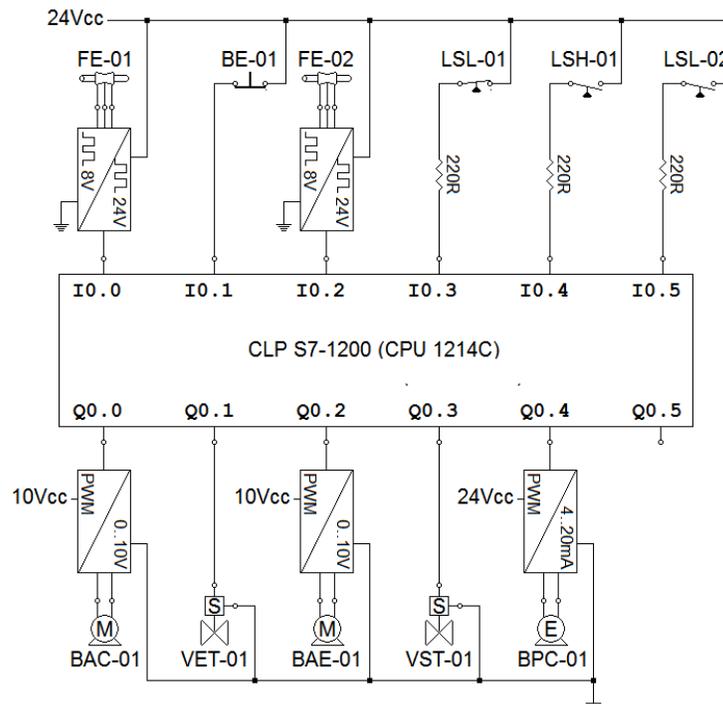
NOTHDURFT, R.; YAO, G. Imaging obscured subsurface inhomogeneity using laser speckle. **Optical Express**, v. 13, 2005.

**APÊNDICE A – PROJETOS DA
PLANTA PILOTO**

1 PROJETO ELÉTRICO

De posse dos dados fornecidos pelos sensores (via sinais elétricos) e pelo PC (via protocolo *ethernet*), o CLP S7-1200 (CPU 1214C, Siemens) da planta piloto processa seu programa e atualiza suas saídas elétricas, comandando os atuadores conectados a elas. Essas conexões entre o CLP e seus sensores e atuadores são mostradas no diagrama esquemático apresentado na Figura A.1 e detalhadas a seguir.

Figura A.1 – Conexões elétricas do CLP da planta piloto: medidores de vazão, botão de emergência e chaves de nível conectadas às suas entradas digitais; bombas motorizadas, válvulas solenóides e bomba eletromagnética (dosadora) conectadas às suas saídas digitais.



Fonte: Do autor (2017).

Com relação às conexões elétricas realizadas nas entradas ($IO.0$ a $IO.5$) e saídas ($Q0.0$ a $Q0.4$) do CLP, merecem destaque as seguintes características:

- *I0.0* e *I0.2* – Para estas entradas digitais, nas quais os medidores de fluxo FE-01 e FE-02 foram respectivamente conectados, foi habilitada a função de contagem de pulsos rápidos (HSC, do termo em inglês *High Speed Counter*), integrada na própria eletrônica da CPU. Isso tornou a saída do medidor, na qual se tem um sinal de pulsos com frequência proporcional ao fluxo de líquido que o atravessa, compatível com a entrada do CLP. Porém, para isso, a amplitude dos pulsos fornecidos pelo medidor precisou ser amplificada de 8 para 24 V, por meio de um circuito baseado em um transistor. Assim, a contagem dos pulsos é realizada pelo *hardware* da CPU e o valor disponibilizado em uma posição de memória escolhida pelo usuário. Verificando-se este valor em intervalos regulares de tempo, é possível determinar a vazão aferida pelo medidor.
- *I0.1* – Com o objetivo de evitar situações de transbordamento nos recipientes da planta, principalmente na fase de depuração do *software* do CLP, o botão de emergência BE-01, normalmente fechado, foi conectado a esta entrada digital. Ao ser pressionado, todos os atuadores são desenergizados;
- *I0.3*, *I0.4* e *I0.5* – Respectivamente, as chaves de nível LSL-01 (nível baixo no medidor de turbidez), LSH-01 (nível alto no medidor de turbidez) e LSL-02 (nível baixo no reservatório de produto coagulante) foram interligadas a estas entradas digitais. O local em que a primeira chave foi instalada obriga-a a trabalhar na posição normal-fechada, enquanto o local de instalação da segunda a obriga a trabalhar na posição normal-aberta. No caso da chave de nível LSL-02, o local de instalação permitiu que a posição de trabalho normal-aberta fosse escolhida. De acordo com uma recomendação do fabricante, um resistor de 220 Ω (5 W) foi ligado em série com cada uma das chaves;

- *Q0.0* e *Q0.2* – Para estas saídas digitais, que foram respectivamente conectadas às cargas elétricas BAC-01 (bomba de água clara) e BAE-01 (bomba de água escura), foi habilitada a funcionalidade de modulação por largura de pulso (PWM, do termo em inglês *Pulse Width Modulation*), integrada na própria eletrônica do CLP. A partir do valor decimal contido em posições de memória escolhidas pelo usuário, o *hardware* da CPU faz o controle da largura dos pulsos produzidos nestas saídas. Isso permite determinar não só o momento de ligar e desligar as cargas, mas também o nível de tensão da componente contínua aplicada a elas, neste caso, alterando a velocidade dos motores. No entanto, estes últimos precisam de uma corrente superior à fornecida pelas saídas do CLP, o que obrigou o uso dos circuitos intermediários que podem ser observados na Figura A.1;
- *Q0.4* – Similarmente ao item anterior, a função de modulação por largura de pulso (PWM) também foi habilitada para esta saída digital. O objetivo é controlar a quantidade de injeções de produto coagulante que a bomba BPC-01 realiza em um determinado intervalo de tempo. No entanto, para isso, esta última precisa de um sinal de referência no padrão 4..20 mA, o que obrigou o uso de um circuito intermediário, responsável por converter o nível de tensão da componente contínua aplicada em sua entrada em uma corrente que varia no mencionado intervalo;
- *Q0.1*, *Q0.3* – De forma direta, as bobinas das válvulas VET-01 (entrada do turbidímetro) e VST-01 (saída do turbidímetro) foram respectivamente conectadas a estas saídas digitais, uma vez que a tensão elétrica produzida pelas últimas é compatível com as primeiras (24 Vcc), e a potência também.

2 PROGRAMAS UTILIZADOS E DESENVOLVIDOS

As ferramentas computacionais utilizadas durante este trabalho foram: Windows XP Professional 32-Bits SP3 (Microsoft), como sistema operacional do PC em que os demais produtos foram instalados; MATLAB R2011b (MathWorks), para o desenvolvimento e execução das sub-rotinas e funções responsáveis pela aquisição e processamento de imagens; SIMATIC WinCC V7.0 SP3, para o desenvolvimento e execução do sistema supervisório da planta piloto; STEP 7 Basic V12 (Siemens), como plataforma de desenvolvimento para as sub-rotinas e funções executadas pelo CLP; PC Access V1.6 (Siemens), como servidor OPC, permitindo a comunicação via rede de dados entre o CLP e seus parceiros, neste caso: sistema supervisório e sub-rotina de processamento de imagens.

A partir das mencionadas plataformas de desenvolvimento, foram implementadas seis sub-rotinas, sendo que uma delas é executada no PC e as demais no CLP. A primeira é responsável por chamar as funções de captura e processamento de imagens, obtendo o valor de turbidez da água a ser tratada e enviando-o para o CLP via rede, conforme descrito na Capítulo 4. As outras cinco sub-rotinas, executadas no CLP, gerenciam todo o funcionamento da planta piloto, sendo que suas características mais relevantes são destacadas a seguir.

- Sub-rotina “Geral” – Gerencia variáveis comuns aos demais elementos do sistema, sendo elas: alarme de emergência atuada, disparado sempre que há uma solicitação por meio da botoeira BE-01, conectada à entrada digital do CLP, ou por meio de um botão virtual no sistema supervisório; alarme de falha de comunicação com a sub-rotina executada no MATLAB®, disparado quando o sinal de pulsos (*lifebit*) gerado por esta última torna-se inativo; de forma análoga, outro sinal de pulsos é gerado na sub-rotina em questão, justamente para sinalizar a atividade do CLP para sistemas externos, no caso o sistema supervisório.

- Sub-rotina “Bombas da captação” – As bombas de água clara (BAC-01) e água escura (BAE-01) são os elementos gerenciados por esta sub-rotina. Esta parte do sistema possui três modos de operação: manual, manutenção e automático. Os comandos que os selecionam podem ser enviados através do sistema supervisor, que também informa ao usuário qual modo está selecionado. No modo manual, novamente por meio desse sistema, o usuário pode escolher quando ligar ou desligar o bombeamento e determinar com qual vazão cada bomba deve ser acionada (controle PI em malha fechada). No entanto, os acionamentos só ocorrem caso nenhuma condição de bloqueio esteja ativa, sendo elas: alarme de emergência e alarme de falha de comunicação com a sub-rotina executada no MATLAB[®]. Quando o modo “manutenção” está selecionado, o funcionamento é similar, exceto pelos fatos de que apenas a emergência é considerada como condição de bloqueio e de que o controle em malha fechada é desconsiderado, permitindo que o usuário escolha diretamente as velocidades das bombas. Por fim, no modo automático, as duas condições de bloqueio mencionadas são respeitadas, porém o usuário fica inabilitado para ligar, desligar ou escolher a vazão das bombas, ficando estas decisões a cargo da sub-rotina “Sequenciador de Vazões da Captação”.
- Sub-rotina “Sequenciador Vazões da Captação” – O objetivo desta sub-rotina é impor mudanças nas características de vazão e turbidez da água bombeada para o misturador, de forma que o comportamento programado possa ser reproduzido em todos os ensaios desejados. Para isso, a partir do momento de partida, os *setpoints* de vazão das bombas BAC-01 e BAE-01 são alterados a cada cinco minutos, de acordo com três etapas compostas por três parâmetros: valor inicial, incremento e valor final. A Tabela A.1 mostra os valores utilizados para estes parâmetros, comuns a todos os ensaios do experimento conduzido.

Tabela A.1 – Valores de fluxo (mL min^{-1}) usados na estrutura de parâmetros da sub-rotina que faz o sequenciamento de vazões das bombas de captação, quando estas estão operando em modo automático.

BOMBA	PARÂMETRO	ETAPA		
		1	2	3
BAC-01	Valor Inicial	400	500	200
	Incremento	+100	-100	+100
	Valor Final	600	300	400
BAE-01	Valor Inicial	600	300	400
	Incremento	-100	+100	-100
	Valor Final	400	500	200

Fonte: Do autor (2017).

Dessa forma, ao se ativar o sequenciamento, as bombas BAC-01 e BAE-01 inicialmente trabalham com vazões de 400 e 600 mL min^{-1} , respectivamente. E assim, por exemplo, após cada um dos três primeiros eventos de transição (que ocorrem a cada 5 minutos) a vazão da bomba BAC-01 assume os valores 500, 600 e 500 mL min^{-1} , terminando após 40 minutos com uma transição que leva a sua vazão de 300 para 400 mL min^{-1} . Após permanecer com este último valor por mais 5 minutos, o sequenciamento é encerrado e a vazão de ambas as bombas torna-se nula.

Por meio da interface de operação proporcionada pelo sistema supervisor, é possível alterar qualquer um dos 18 parâmetros mostrados na Tabela A.1, além do tempo entre os eventos de transição, flexibilizando o uso da planta piloto para trabalhos futuros. Os comandos para iniciar (*play*) e cancelar (*stop*) o sequenciamento também foram implementados no supervisor. De forma similar ao caso do acionamento manual das bombas de captação, o comando *play* só é atendido se nenhuma condição de bloqueio estiver ativa,

neste caso: modo automático *não* selecionado nas sub-rotinas “Bombas da Captação” ou “Sequenciador de Amostragem”; e sub-rotinas “Bombas da Captação” ou “Dosagem de Produto Coagulante” bloqueadas por alguma de suas respectivas condições. Além de impedir a ativação do sequenciador de vazões, suas condições de bloqueio “congelam” seu funcionamento, caso ele esteja em operação. Por exemplo, se o usuário selecionar o modo manual para a sub-rotina “Sequenciador de Amostragem”, o sequenciador de vazões entra em condição de bloqueio, interrompendo a contagem de tempo que gera os eventos de transição e levando as vazões das bombas de captação para 0 mL min^{-1} . Quando o bloqueio deixa de existir, seu funcionamento é restabelecido.

- Sub-rotina “Dosagem de Produto Coagulante” – O principal objetivo desta sub-rotina é gerenciar a bomba de produto coagulante (BPC-01). Os modos de operação são os mesmos adotados para as bombas de captação: manual, manutenção e automático. A interface para selecioná-los e mostrar qual está selecionado também é a mesma, isto é, o sistema supervisor. No entanto, seja qual for o modo selecionado, a primeira tarefa realizada é o tratamento dos sinais de pulsos fornecidos pelos medidores de vazão (FE-01 e FE-02), que são amostrados em intervalos regulares de tempo e convertidos para valores expressos em unidade de engenharia, no caso mL min^{-1} . Quando o modo automático está selecionado, além de serem apresentados para o usuário, estes valores são somados e o resultado é utilizado para alimentar a primeira entrada do controlador *fuzzy*. Sua segunda entrada é preenchida com o valor de turbidez, enviado ao CLP pelo microcomputador já em NTU, conforme descrito na Capítulo 4. A variável de saída deste controlador é a vazão de produto coagulante, também expressa em mL min^{-1} e utilizada para reger o comportamento da bomba dosadora BPC-01, da seguinte forma: quando o modo automático está selecionado e nenhuma das condições de

bloqueio descritas mais adiante está ativa, a vazão é convertida em um valor adimensional que determina a largura dos pulsos gerados na saída Q0.4 do CLP, na qual a bomba está conectada, conforme descrito na primeira seção deste apêndice. No modo manual, o funcionamento é similar, porém a vazão de produto coagulante é determinada diretamente pelo usuário, em vez de ser calculada pelo controlador *fuzzy*. Nos dois casos, a dosagem só ocorre caso nenhuma condição de bloqueio esteja ativa, sendo elas: alarme de emergência e nível baixo no reservatório de produto coagulante. Esta última condição, por sua vez, é a única diferença entre os modos manual e manutenção, pois neste último ela não é considerada.

- Sub-rotina “Sequenciador de Amostragem” – Com base nos sinais enviados pelas chaves de nível alto (LSH–01) e nível baixo (LSL–01), instaladas no interior do medidor de turbidez, esta sub-rotina executa as manobras de abertura e fechamento das duas válvulas solenóides presentes na planta piloto: VET–01 (válvula de entrada do turbidímetro) e VST–01 (válvula de saída do turbidímetro). O objetivo das manobras é cumprir o procedimento de amostragem descrito a seguir, considerando, como condição inicial, que as duas válvulas estão fechadas e que a cubeta do medidor está vazia.

1. Homogeneização da nova amostra:

- (a) Abre válvula VET–01;
- (b) Aguarda até que a condição de nível baixo no medidor não esteja mais ativa;
- (c) Fecha válvula VET–01 e abre válvula VST–01;
- (d) Aguarda até que a condição de nível baixo no medidor volte a estar ativa;

2. Preparação da amostra para processamento de imagens:

- (a) Fecha válvula VST–01 e abre válvula VET–01;

- (b) Aguarda até que a condição de nível alto no medidor se torne ativa;
- (c) Fecha válvula VET-01;
- (d) Atribui nível lógico alto para o *flag* que sinaliza que há uma amostra pronta para análise na cubeta do medidor;
- (e) Aguarda até que o *flag* mencionado no item anterior volte para nível lógico baixo, indicando que a sub-rotina descrita no Capítulo 4 finalizou a aquisição e o processamento de imagens da amostra;

3. Descarte da amostra analisada:

- (a) Abre válvula VST-01;
- (b) Aguarda até que a condição de nível baixo no medidor volte a estar ativa;
- (c) Fecha válvula VST-01.

Quando esta sub-rotina está operando em modo automático, o procedimento acima é realizado 30 segundos após as bombas de captação entrarem em funcionamento e repetido periodicamente durante todo o ensaio, com intervalos de 30 segundos entre seu término e recomeço. Já em modo manual, os comandos “Realizar amostragem” e “Cancelar amostragem” tornam-se disponíveis no sistema supervisão, permitindo que o usuário realize o mesmo procedimento sempre que achar necessário. Conferindo um maior poder de decisão ao usuário, o modo manutenção habilita os comandos “Abrir” e “Fechar” para cada uma das duas válvulas gerenciadas por esta sub-rotina. No entanto, mesmo em manutenção, a chave de nível alto no medidor de turbidez é uma condição de bloqueio para a abertura da válvula VET-01. Além disso, em todos os modos de operação, os alarmes “emergência atuada” e “falha de comunicação com a sub-rotina executada

no MATLAB[®] impedem que ambas as válvulas sejam ou permaneçam abertas.