

Turbidímetro Baseado em Processamento de Imagens: Elaboração e Avaliação de Desempenho por meio de uma Planta Piloto *

Dimitri C. Viana * Roberto A. Braga * Bruno Henrique G. Barbosa *
Alessandra Rose C. R. Campos * Danton D. Ferreira *

* Departamento de Automática, Universidade Federal de Lavras, MG,
(e-mail: dimitri@ufla.br, robbraga@ufla.br, brunohb@ufla.br,
alessandracampos@ufla.br, danton@ufla.br)

Abstract: The dosage of chemicals products represents one of the main benefits that automation systems can bring to water treatment processes. However, the investments required can discourage the use of these systems and, in some cases, make the project unfeasible, especially for small treatment plants. So, the search for less costly solutions is a point of great interest, once the purification of natural waters is increasingly necessary. In the present work, a turbidimeter based on image processing was developed in order to provide results for a small Programmable-Logic Controller (PLC), in which a coagulant product dosing system can be implemented. The system's performance was evaluated through a pilot plant and the results were satisfactory in all repetitions of the experimental procedure adopted, indicating the feasibility of the proposed method.

Resumo: A dosagem 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 turbidímetro baseado em processamento de imagens foi desenvolvido de forma a fornecer resultados para um Controlador Lógico-Programável (CLP) de pequeno porte, no qual um sistema de dosagem de produto coagulante pode ser implementado. 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.

Keywords: Water treatment; Turbidity; Image processing; Automatic dosage; Pilot plant.

Palavras-chaves: Tratamento de água; Turbidez; Processamento de imagens; Dosagem automática; Planta piloto.

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,

* Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, Capes e Fapemig.

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 e 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 et al., 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 (do termo em inglês, *Nephelometric Turbidity Unit*), 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 e Hou, 2006; Wu e 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.

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 de 4 a 20 mA, de 0 a 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 digital possa futuramente calcular a quantidade de produto coagulante a ser adicionada ao tratamento.

Assim como em trabalhos similares (Chen 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 dois subsistemas: captação

de água e amostragem automática. 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 a etapa de captação de uma ETA. Além disso, conforme pode ser observado na Figura 1, esta planta possui um sistema automático de amostragem cujo objetivo é permitir que a turbidez da água captada seja ciclicamente mensurada.

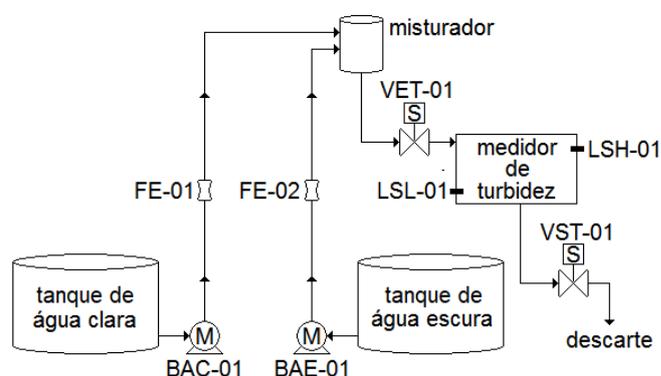


Figura 1. Principais componentes da planta piloto: reservatórios, bombas elétricas, válvulas solenóides, medidores de vazão e turbidez, chaves de detecção de nível e conexões hidráulicas.

As conexões hidráulicas foram estabelecidas por meio de mangueiras de poliuretano de 6 mm e conectores de engate rápido. Os recipientes utilizados são de plástico e possuem capacidade individual de 35 L, com exceção do misturador, de 0,7 L.

Por sua vez, as principais características dos sensores e atuadores que aparecem na Figura 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 na Subseção 2.3, inclusive com a descrição das duas chaves de nível que incorpora;

2.2 Automação e Resumo do Funcionamento

Conforme pode ser observado na Figura 2, o sistema de automação 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.

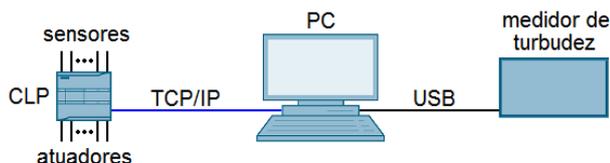


Figura 2. Principais elementos do sistema de automação da planta piloto e suas interações: CLP, comunicando-se via protocolo *Ethernet* com o PC, que por sua vez se comunica via interface USB com a câmera embutida no medidor de turbidez.

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 na Subseção 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*.

Por sua vez, o CLP (S7-1200, Siemens) foi responsável por receber os comandos e parâmetros enviados pelo sistema supervisório, realizar a leitura de suas entradas elétricas (às 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 (às quais foram conectadas as válvulas e motores da planta), de acordo com o diagrama elétrico que pode ser observado na Figura 3.

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

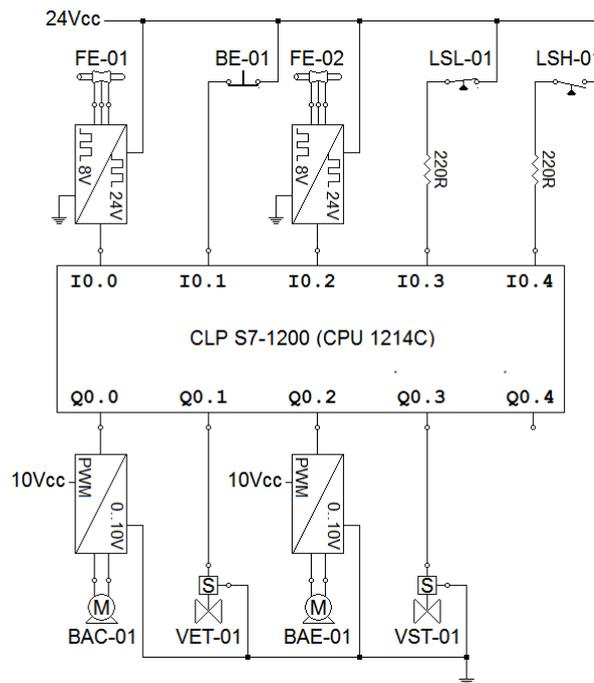


Figura 3. Conexões elétricas do CLP da planta piloto: medidores de vazão, botão de emergência e chaves de nível conectadas às suas entradas digitais; bombas motorizadas e válvulas solenóides conectadas às suas saídas digitais.

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 sofre 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.

2.3 Medição de Turbidez por Processamento de Imagens

A representação esquemática do turbidímetro baseado em processamento de imagens, desenvolvido como protótipo no presente trabalho, pode ser observada na Figura 4.

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. O emissor laser

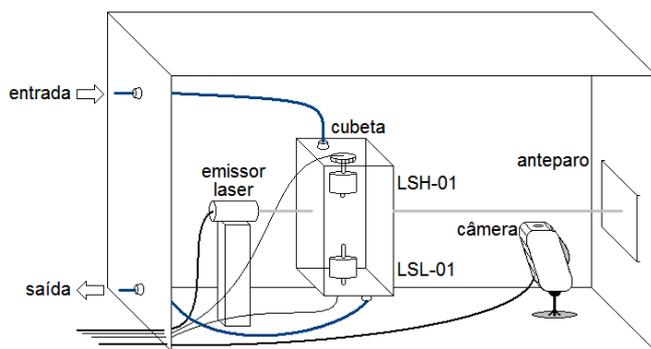


Figura 4. Diagrama esquemático do medidor de turbidez desenvolvido: emissor laser, cubeta com chaves de nível alto e nível baixo (para permitir amostragens automáticas), câmera USB e anteparo; montagem em câmara escura de dimensões $33\text{cm} \times 24\text{cm} \times 10\text{cm}$ (comprimento \times altura \times profundidade).

(IRL104A2B, Seeed Studios) permaneceu ligado durante a operação do medidor, 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 no 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[®]);
- (4) Construção da matriz intermediária conhecida como THSP (do termo em inglês, *Time History of the Speckle Pattern*), conforme proposto por Arizaga et al. (1999), 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 (*lifebit*) 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 preliminar, 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 (TB-1000, MS TECNOPON Instrumentação). Assim, a partir dos cinco pares de valores levantados, fez-se uma análise de regressão e determinou-se os coeficientes desejados.

2.4 Planta Piloto

Agrupando-se os elementos descritos nas Subseções 2.1, 2.2 e 2.3 em uma estrutura metálica dividida em três patamares, obteve-se a planta piloto que pode ser observada na Figura 5. Nela, foram conduzidos os três ensaios cujo procedimento está descrito na próxima subseção.

2.5 Amostras e Procedimento Experimental

A composição e o volume das soluções utilizadas em cada um dos três ensaios conduzidos foram os 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;

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;

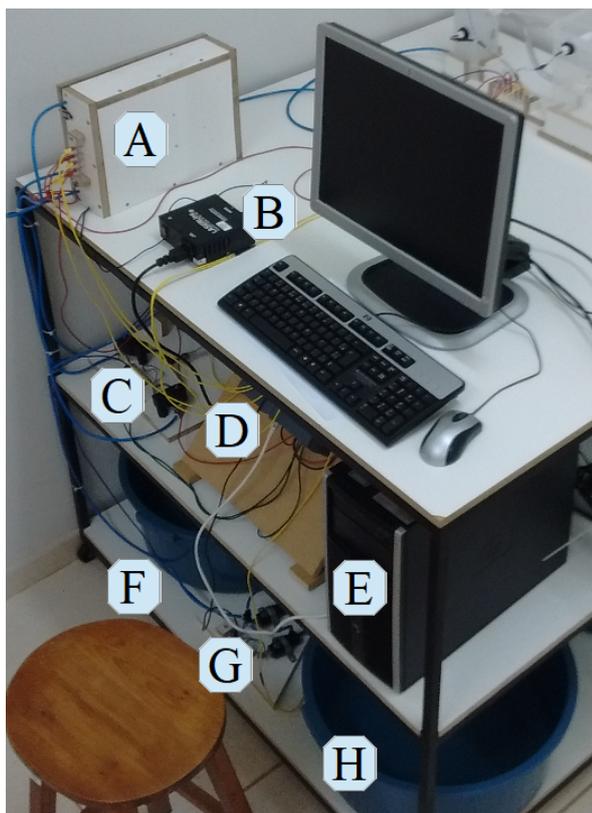


Figura 5. Planta piloto, de um panorama em que se vê: A) protótipo do medidor de turbidez; B) fonte de alimentação do emissor laser; C) válvulas solenóide; D) parte inferior do CLP; E) gabinete do PC; F) reservatório de água escura; G) bombas de água; H) reservatório de água clara.

- (3) Calibração do medidor proposto de acordo com o procedimento descrito anteriormente;
- (4) Limpeza dos recipientes de água clara e água escura;
- (5) Preparação das amostras (conforme descrição anterior);
- (6) Ativação dos módulos de captação de água e amostragem automática da planta piloto;
- (7) Após o término do ensaio, retorno ao passo 4 (até que três ensaios tenham sido realizados).

2.6 Acompanhamento das Medições de Turbidez

O turbidímetro tradicional, utilizado para calibrar o medidor proposto, também foi empregado para acompanhar os resultados fornecidos por esse último durante a operação da planta. Para tal, após o escoamento que ocorre ao fim do ciclo de amostragem, 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

Conforme 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 tradicional, podem ser observados na Figura 6.

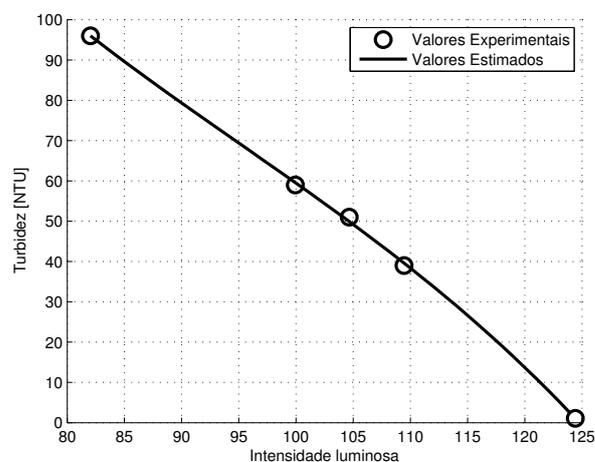


Figura 6. Representação cartesiana da correspondência entre valores de intensidade luminosa e valores de turbidez. Os pontos apresentam os resultados das análises das cinco amostras de calibração. A linha representa os valores de turbidez fornecidos pelo polinômio de conversão em função dos valores de intensidade luminosa contidos no intervalo de interesse.

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 $R^2 = 99,9\%$:

$$T = -0,0004 \cdot I^3 + 0,1141 \cdot I^2 - 12,8369 \cdot I + 601,7763 \quad (1)$$

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

Além do mapeamento representado pela linha sólida que aparece na Figura 6, todos os valores de intensidade luminosa obtidos a partir desse momento foram convertidos para NTU por meio da Equação 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 7. 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 que 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.

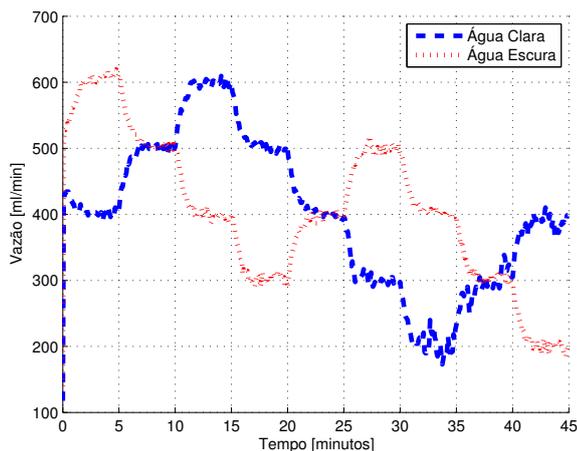


Figura 7. Vazões produzidas pelas bombas de água clara (linha tracejada) e água escura (linha pontilhada) ao longo dos 45 minutos do ensaio referente à primeira repetição do experimento realizado.

- 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 8. 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).

Comparando os resultados fornecidos pelos dois medidores de turbidez, o erro absoluto médio foi de $2,12 \text{ NTU}$. Nas duas outras repetições, os valores foram respectivamente $2,23 \text{ NTU}$ e $1,67 \text{ NTU}$. 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

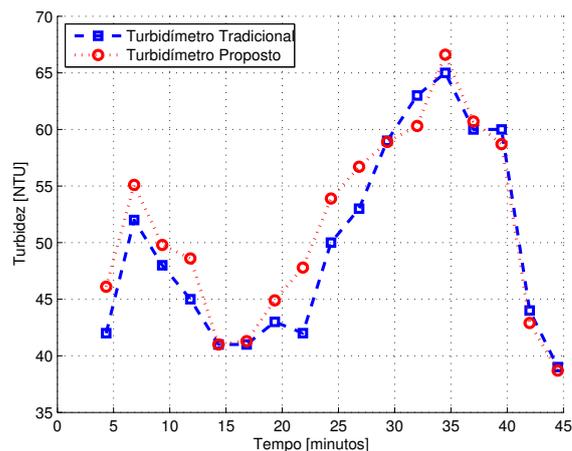


Figura 8. Valores de Turbidez obtidos por meio do turbidímetro tradicional (quadrados interpolados por linha tracejada) e os fornecidos pelo turbidímetro proposto (círculos interpolados por linha pontilhada). As marcações representam os valores obtidos nos instantes de amostragem e as linhas apenas fornecem uma estimativa de comportamento em momentos intermediários.

processamento de imagens apresentou um desempenho satisfatório.

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. 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 todo o tempo.

Além do uso de componentes de baixo custo (o valor total¹ não ultrapassou 5% do valor do medidor tradicional), 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 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.

¹ O custo do PC não foi considerado, pois este não precisa ser usado de forma dedicada ao medidor proposto.

REFERÊNCIAS

- Arizaga, R., Trivi, M., e Rabal, H. (1999). Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. *Optics Laser Technology*, 31, 163–169.
- Belisário, M., Borges, P., Galazzi, R., Del Piero, P., Zorzal, P., Ribeiro, A., e Ribeiro, J. (2009). O emprego de resíduos naturais no tratamento de efluentes contaminados com fármacos poluentes. *Revista Científica Internacional*, 10, 1–13.
- Burlingame, G.A., Pickel, M.J., e Roman, J.T. (1998). Practical applications of turbidity monitoring. *American Water Works Association. Journal*, 90, 57.
- Chen, C.L. e Hou, P.L. (2006). Fuzzy model identification and control system design for coagulation chemical dosing of potable water. *Water Science and Technology: Water Supply*, 6, 97–104.
- Chen, F., Peldszus, S., Peiris, R.H., Ruhl, A.S., Mehrez, R., Jekel, M., Legge, R.L., e Huck, P.M. (2014). Pilot-scale investigation of drinking water ultrafiltration membrane fouling rates using advanced data analysis techniques. *Water Research*, 48, 508–518.
- García-Vaquero, N., Lee, E., Castañeda, R.J., Cho, J., e López-Ramírez, J.A. (2014). Comparison of drinking water pollutant removal using a nanofiltration pilot plant powered by renewable energy and a conventional treatment facility. *Desalination*, 347, 94–102.
- Kelley, C.D., Krolick, A., Brunner, L., Burklund, A., Kahn, D., Ball, W.P., e Weber-Shirk, M. (2014). An affordable open-source turbidimeter. *Sensors*, 14, 7142–7155.
- Libânio, M. (2010). *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. Átomo, 3 edition.
- Nam, S.W., Jo, B.I., Kim, M.K., Kim, W.K., e Zoh, K.D. (2013). Streaming current titration for coagulation of high turbidity water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 419, 133–139.
- Shannon, M.A., Bohn, P.W., Elimelech, M., Georgiadis, J.G., Marinas, B.J., e Mayes, A.M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301–310.
- Tiwari, M.K. e Adamowski, J. (2013). Urban water demand forecasting and uncertainty assessment using ensemble wavelet-bootstrap-neural network models. *Water Resources Research*, 49, 6486–6507.
- Viana, D.C. e Braga, R.A. (2015). Turbidímetro de baixo custo baseado em processamento de imagens. In *CONBEA 2015: Saneamento e Controle Ambiental*.
- Wu, G.D. e Lo, S.L. (2008). Predicting real-time coagulant dosage in water treatment by artificial neural networks and adaptive network-based fuzzy inference system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21, 1189–1195.
- Yu, R.F., Chen, H.W., Cheng, W.P., e Shen, Y.C. (2009). Application of ph-orp titration to dynamically control the chlorination and dechlorination for wastewater reclamation. *Desalination*, 244, 164–176.