

Desenvolvimento de equipamento de monitoramento contínuo da floculação

Development of equipment for continuous monitoring of flocculation

• **Data de entrada:**
06/11/2013

• **Data de aprovação:**
19/01/2015

Marcelo De Julio* | Atila Brizola Ribas | Bruno Lima Silva | Wagner Chiepa Cunha

DOI 10.4322/dae.2014.149

Resumo:

O tratamento de água consiste em um sistema composto por diferentes etapas, entre as quais se deve destacar a importância da floculação, uma vez que as etapas seguintes à coagulação e floculação (decantação/flotação e filtração) são extremamente dependentes das características dos flocos formados. Dessa maneira, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um equipamento para monitoramento contínuo da floculação. O equipamento forneceu um indicador muito sensível à formação de agregados, oferecendo, assim, informações valiosas dos estágios de formação dos flocos desde seu início. Sendo assim, torna-se uma opção muito eficaz para monitoramento contínuo (*on-line*), o qual é ideal para acompanhamento da operação da floculação em estações de tratamento de água. O protótipo final atingiu seu objetivo, realizando medidas numa gama de turbidez de 5 a 1.000 NTU.

Palavras-chave: Floculação. Monitoramento contínuo. Desenvolvimento de equipamento.

Abstract:

The water treatment is a system composed of different stages. Among these stages it is important to highlight the importance of flocculation because the following stages after flocculation (sedimentation/flotation and filtration) are extremely dependent on the characteristics of the formed flocs. In this way, this paper aims to demonstrate the assembly of equipment for continuous monitoring of flocculation. The equipment provides a very sensitive indicator for the formation of aggregates, and can offer valuable information of the stages of flocs formation since its beginning. Such equipment offers a very effective option for the online continuous monitoring which is ideal for the continuous flocculation (on-line) monitoring in Water Treatment Plants. The final prototype had accomplished its purpose, performing a range of turbidity measures of 5 to 1000 NTU.

Keywords: Flocculation. Continuous monitoring. Equipment development.

Marcelo De Julio

Doutor em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). Professor da Divisão de Engenharia Civil do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). *E-mail:* dejulio@ita.br.

Atila Brizola Ribas

Mestre em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica pelo ITA. *E-mail:* atila88@gmail.com.

Bruno Lima Silva

Engenheiro Eletrônico pelo ITA. *E-mail:* brunosk182@gmail.com.

Wagner Chiepa Cunha

Doutor em *Systems Engineering Course* pela Universidade de Hiroshima. Professor da Divisão de Engenharia Eletrônica do ITA. *E-mail:* chiepa@ita.br.

***Endereço para correspondência**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Civil
CTA ITA IEI, Praça Marechal Eduardo Gomes, nº 50, sala 2137
Vila das Acácias – São José dos Campos, SP – Brasil
12228-900

INTRODUÇÃO

A qualidade da água é de extrema importância para a saúde pública, pois está intrinsecamente ligada à profilaxia de muitas doenças. Assim, é um desafio para os operadores de Estações de Tratamento de Água (ETAs) gerenciar e melhorar os processos atuais de tratamento para garantir o abastecimento seguro de água potável para toda a população (STAAKS et al., 2011). Isso envolve a remoção de alguns contaminantes, sejam eles biológicos, físicos ou químicos, e, para isso, uma variedade de técnicas de tratamento de água foi desenvolvida no sentido de garantir que os contaminantes sejam removidos ou reduzidos nos sistemas de distribuição de água tratada (HO et al., 2012).

Embora existam várias recomendações de diferentes autores, as quais permitem relacionar a qualidade da água com a tecnologia de tratamento adequada a ser empregada em cada caso, é imprescindível que sejam realizados estudos de tratabilidade em escala de bancada e piloto, a fim de selecionar com segurança o tipo de tecnologia a ser aplicado e definir os parâmetros operacionais e de projeto (ARBOLEDA, 2000; QASIM et al., 2000; DI BERNARDO et al., 2011). Entre as tecnologias de tratamento de água, a mais empregada nas ETAs do Brasil é o tratamento em ciclo completo, que consiste nas seguintes etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoração e estabilização final.

Durante a etapa de coagulação, ocorre a adição de agentes coagulantes, que propiciam a desestabilização das impurezas para que estas possam formar agregados (flocos), que serão removidos em etapas posteriores (EDZWALD, 2011).

O tamanho do floco é fundamental para a eficiência da etapa de decantação, uma vez que esta se dá pela ação da gravidade. Portanto, um floco de massa específica e tamanho adequados facilita sua remoção nos decantadores, fazendo da decantação a principal etapa de clarificação

da água. A floculação é fundamental no intuito de otimizar sua operação, porque é a etapa responsável pela formação dos flocos (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Observa-se, desse modo, que é de suma importância para a qualidade da água produzida por uma ETA o conhecimento a respeito da formação dos flocos, sua distribuição e sua concentração, possibilitando um funcionamento otimizado de todo o sistema.

Em busca de um controle eficaz e confiável da qualidade da água que se produz numa ETA, podem-se automatizar inúmeros subprocessos, como medidores de vazão, dosadores de produtos químicos, lavagem dos filtros, entre outros. Nos processos de automação de dosagens de coagulante, são utilizados zetômetros, os quais possuem o objetivo de indicar a mobilidade eletroforética (migração de espécies carregadas eletricamente), ou seja, mostrar o potencial zeta da solução.

O potencial zeta é frequentemente medido nas ETAs para indicar aos operadores a estabilidade do sistema coloidal (QASIM et al., 2000). O ponto em que ele apresenta valor igual a zero é conhecido como ponto isoelétrico (piz) (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). O piz é factível com a desestabilização das cargas superficiais dos colóides presentes na água, sendo possíveis a aderência e a adsorção.

Apesar de ser usado o zetômetro, o potencial zeta não indica necessariamente o potencial de superfície (DI BERNARDO et al., 2011); logo, a formação de flocos de melhor qualidade pode-se dar em um potencial zeta não tão próximo a zero.

Em virtude de sua importância dentro de uma ETA com tratamento em ciclo completo, diversos autores desenvolveram diferentes metodologias de monitoramento da floculação. Segundo Gregory e Nelson (1984) e Gregory (2009), as técnicas baseadas em contadores de partículas, fundamentadas nos princípios de Coulter (MATTHEWS; RHODES, 1970),

no bloqueio da luz com o uso do contador Hiac (JECKEL, 1982) ou em contadores baseados na dispersão e luz (WALSH et al., 1981; CUMMINS et al., 1983), deram contribuições no sentido de análise da dispersão de tamanho dos flocos. Entretanto, problemas operacionais dificultavam a aplicação desses métodos, como, por exemplo, podem-se citar a necessidade de diluição das amostras, o efeito de coincidência de partículas, a quebra de flocos em orifícios de contagem ou de sensores, entre outros.

Com base no presente contexto, este trabalho visou a desenvolver um equipamento para monitoramento contínuo da floculação, baseado no princípio das “flutuações da turbidez”, proposto por Gregory e Nelson (1984) e Gregory (1985). Para o desenvolvimento desse equipamento, foram utilizados componentes adquiridos no mercado nacional.

Com essa técnica de monitoramento, foram desenvolvidos estudos de relevância nas mais diferentes áreas de aplicação. Entre os mais importantes, podem-se citar as aplicações na indústria de papel e celulose (GIBBS; PELTON, 1999), o monitoramento da agregação do asfalto (RAHMANI et al., 2005) e o tratamento de esgoto (NGUYEN et al., 2007). Entre os trabalhos mais recentes, encontram-se estudos sobre a resistência dos flocos (JIN et al., 2007), as condições de mistura (KIM et al., 2008), o efeito do pré-tratamento com resinas trocadoras de íons, o monitoramento da formação dos flocos com diferentes coagulantes para tratamento de esgoto de suinocultura (KORNBOONRAKSA et al., 2009), flutuações de turbidez como medida de tamanho do floco num estudo de coagulação em estação-piloto (CHENG et al., 2011) e medições de concentração de algas na água (LIANG et al., 2010).

MATERIAL E MÉTODOS

Os princípios básicos dessa técnica foram antecipadamente discutidos (GREGORY; NELSON, 1984; GREGORY, 1985) e suas aplicações para o monitoramento da floculação foram descri-

tas (GREGORY; NELSON, 1986). Resumidamente, a intensidade de um feixe de luz transmitido através de uma suspensão fluindo por um tubo é monitorada por um fotodetector; os resultados consistem num sinal de componente estável ou contínua (DC) e de componente flutuante ou alternada (AC), medidos por meio de um circuito eletrônico. A DC é simplesmente uma medida da intensidade média de luz transmitida e depende da turbidez (e, portanto, da concentração de sólidos) da suspensão. As flutuações no sinal da luz transmitida surgem de variações aleatórias oriundas da composição da amostra no feixe de luz, a qual é continuamente renovada pelo fluxo. Essas variações surgem da não uniformidade da suspensão e seguem a distribuição estatística de Poisson; logo, o desvio padrão do valor médio da concentração de partículas é simplesmente a raiz quadrada do valor médio. Isso implica que o valor quadrático médio (RMS) desse sinal flutuante (AC) depende da raiz quadrada da concentração média de partículas.

Gregory (1985), portanto, por meio de sua conceituação, pôde comprovar que a razão RMS/DC, também chamada Índice de Floculação (IF), pode ser calculada como:

$$IF = \frac{V_{RMS}}{V_{DC}} = (L/A)^{1/2} (\sum N_i C_i^2)^{1/2} \quad (1)$$

Em que: L é a distância do caminho óptico percorrido pelo feixe de luz ao atravessar a suspensão; A é a área transversal do feixe de luz; Ni é o número das i diferentes partículas em suspensão; e Ci é a seção transversal de dispersão óptica de cada uma das i diferentes partículas da suspensão. Dessa maneira, diferentes fatores podem influenciar a intensidade da luz transmitida (e, portanto, a turbidez).

O fluido foi bombeado através do tubo por uma bomba peristáltica. A água não entrou em contato com rotores ou qualquer outro sistema de bombeamento, evitando a quebra dos flocos. Além

desse fato, a bomba ficou localizada posteriormente ao equipamento de medição, evitando ainda mais as possíveis interferências nos resultados.

Suspensões de caulinita foram dissolvidas em água de poço até atingir a turbidez desejada. Essa suspensão de caulinita foi preparada com metodologia semelhante à adotada por Yukselen e Gregory (2004). Para realizar a simulação da coagulação e floculação, foi utilizado um jarro do *jar test*, em conjunto com o protótipo do equipamento de monitoramento.

O equipamento desenvolvido atingiu seu objetivo, a saber, monitorar a floculação logo após a dosagem de coagulante para valores de turbidez da água de estudo variando de 5 a 1.000 NTU. Mais detalhes sobre os resultados obtidos podem ser visualizados na dissertação completa deste trabalho (RIBAS, 2013).

CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

O funcionamento do equipamento de monitoramento contínuo da floculação consiste na passagem de suspensão por um tubo capilar de material plástico com diâmetro interno (Φ_i) de 4 mm e externo (Φ_e) de 6 mm. Um feixe de luz, emitido por um diodo emissor de luz (LED), atravessa transversalmente o tubo capilar, em que corre o fluxo de suspensão da amostra, incidindo no detector de luz, um fotodiodo com resposta espectral compatível com a do feixe emitido, como mostrado na Figura 1.

O feixe de luz, ao atravessar a suspensão em fluxo, tem parte de sua intensidade luminosa dispersada (e absorvida) pelas partículas, sendo, portanto, sua intensidade menor no detector. O detector é estimulado pela luz incidente, de modo que se produz uma diferença de potencial em seus terminais.

O sinal da diferença de potencial produzida pelo detector possui duas componentes, DC e AC. A componente contínua expressa a intensidade média de luz transmitida. A componente variável

representa as pequenas variações na intensidade da luz transmitida, decorrentes da aleatoriedade das partículas na suspensão iluminada pelo feixe de luz. O método de monitoramento é baseado, portanto, na medição das variações de turbidez, expressas pela AC.

Além da medição das componentes DC e AC, a partir desta é calculada uma terceira componente: a componente RMS, proveniente do inglês *Root Mean Square*, que significa valor médio quadrático. Define-se essa componente como uma série de medidas estatísticas das magnitudes de intervalos de um sinal variável. O cálculo da componente RMS é uma forma simples de avaliar um sinal flutuante, estando relacionada à energia total desse sinal. No caso das partículas na suspensão, a componente RMS do sinal oscilante pode ser relacionada com o desvio padrão do número médio de partículas fluando no volume da amostra (GREGORY, 1985).

De maneira a evitar interferências (*fouling*, por exemplo) nos valores de RMS, Gregory (1985) sugere a divisão da componente RMS pela componente DC. Assim sendo, como as duas componentes são afetadas similarmente por interferências, estas seriam anuladas.

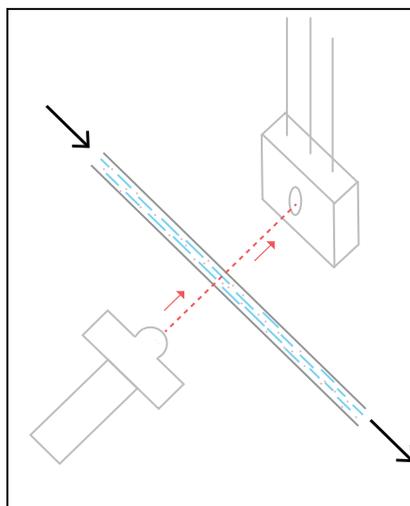


Figura 1- Esquema de posicionamento de emissão e recepção.

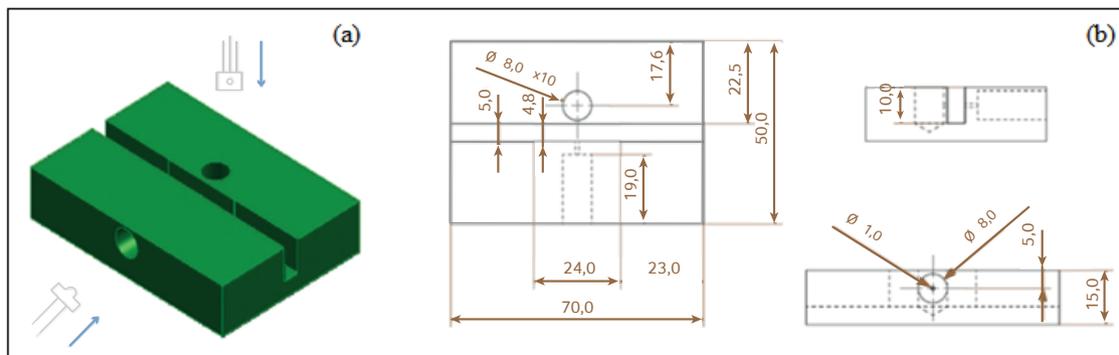


Figura 2- (a) Layout do bloco metálico e (b) dimensões do bloco metálico.

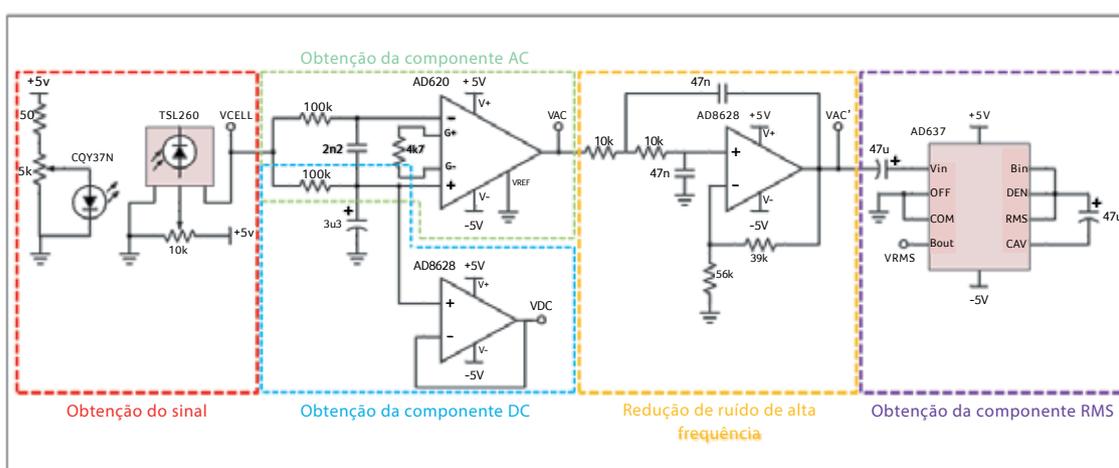


Figura 3- Esquema do circuito de separação e amplificação dos sinais RMS e DC.

Fonte: John Gregory (2011).

A fonte de luz e o detector foram montados em um pequeno bloco de metal (aço 1045). A luz passava através de um pequeno orifício ($\Phi = 1$ mm), em seguida através da amostra fluindo pelo tubo e, por último, através de outro orifício de mesmo diâmetro, chegando até o detector. Na Figura 2, são apresentados o *layout* do bloco metálico e suas dimensões.

O sistema eletrônico do equipamento, apresentado na Figura 3, é composto por cinco estágios: obtenção do sinal (V_{CELL}), obtenção da componente DC (V_{DC}), obtenção da componente AC (V_{AC}), redução de ruído de alta frequência (V'_{AC}) e obtenção da componente RMS (V_{RMS}).

OBTENÇÃO DO SINAL

O sinal de interesse (V_{CELL}), cuja característica e componentes são apresentadas na Figura 4, é obtido pela transmissão e recepção de luminosidade por um par de emissor e receptor de resposta espectral compatível.

O emissor utilizado é um CQY37N, correspondente a um diodo emissor de luz de infravermelho com pico de emissão com comprimento de onda (λ) de 950 nm.

A corrente elétrica que passa pelo emissor pode ser ajustada por meio de um potenciômetro (5 k Ω), de modo que a intensidade luminosa emitida é regulável.

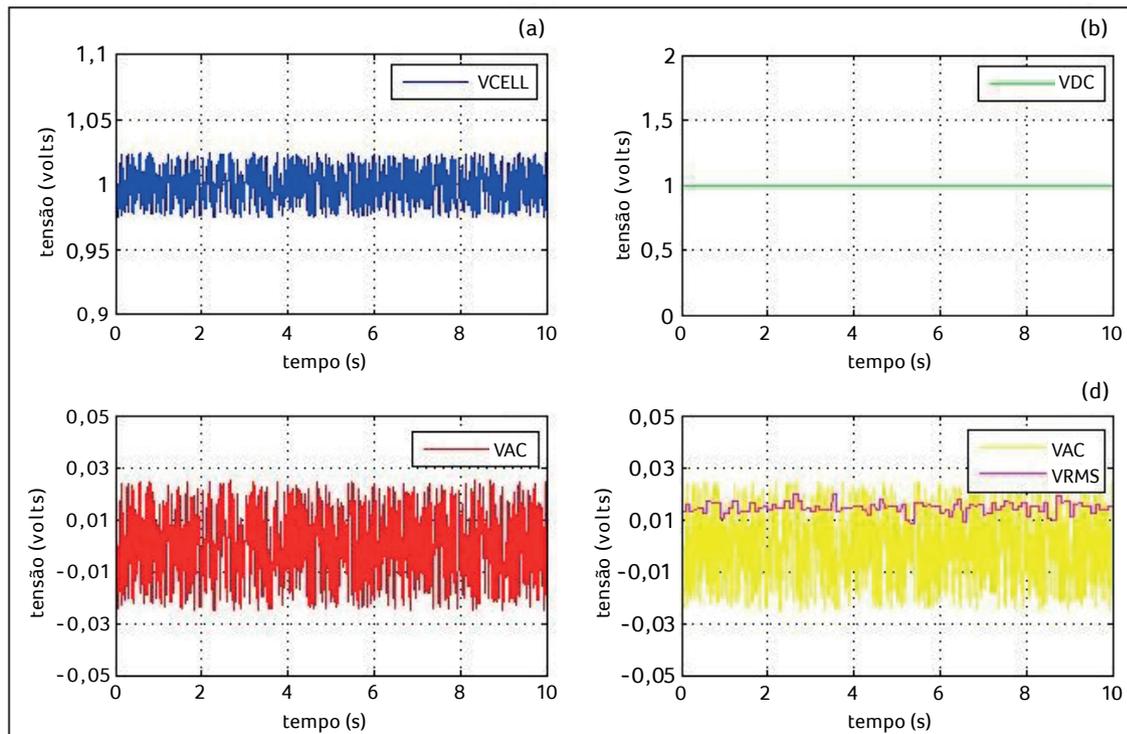


Figura 4 - (a) Característica do sinal V_{CELL} , (b) componente DC do sinal V_{CELL} , (c) componente AC do sinal V_{CELL} e (d) componente RMS da componente AC.

O receptor utilizado é um TSL260, composto por um fotodiodo com pico de recepção de 940 nm e um amplificador de transimpedância. O sensor óptico converte intensidade luminosa em tensão de saída. A tensão de saída é diretamente proporcional à intensidade de infravermelho recebida pelo fotodiodo.

OBTENÇÃO DA COMPONENTE DC

A componente DC do sinal de interesse (V_{DC}) é obtida por meio de dois estágios: malha resistor-capacitor e montagem amplificadora de seguidor de tensão. A malha resistor-capacitor funciona como um filtro passa-baixo, de modo que somente as frequências baixas do sinal V_{CELL} são preservadas. A componente DC é tal que sua frequência é nula; portanto, a malha a preserva e elimina as componentes de frequências superiores. A montagem de seguidor de tensão faz uma cópia da tensão de entrada do amplificador em sua saída, de forma a permitir a leitura da componente DC

nesse ponto, sem que haja qualquer interferência no sinal devido à própria medição.

OBTENÇÃO DA COMPONENTE AC

A componente AC do sinal de interesse (V_{AC}) é obtida por meio de um amplificador de instrumentação e da malha resistor-capacitor. Em uma das entradas do amplificador (entrada inversora (-)), há um sinal praticamente idêntico à V_{CELL} , enquanto, em outra entrada (entrada não inversora (+)), há o sinal V_{DC} proveniente da malha resistor-capacitor. A partir dessa configuração, a diferença entre esses dois sinais, que corresponde ao sinal V_{AC} , é amplificada na saída do amplificador, ou seja, é multiplicada por um ganho, um valor escalar ajustável por resistor (4k7) conectado ao amplificador.

REDUÇÃO DE RÚIDO DE ALTA FREQUÊNCIA

O ruído de alta frequência é atenuado, isto é, reduzido, por meio de montagem de amplificador como filtro passa-baixo. Tal montagem permite

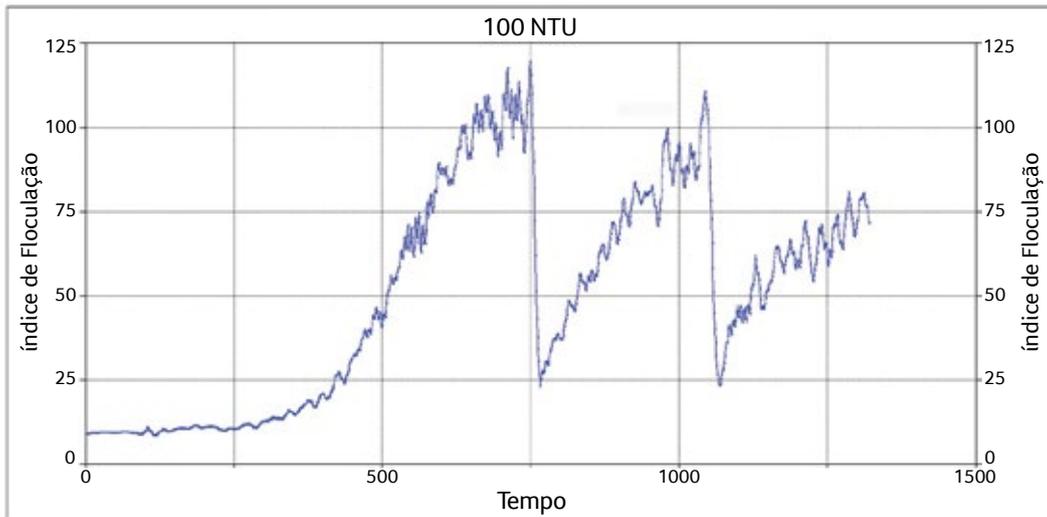


Figura 5 - Teste realizado com turbidez de 100 NTU, dosagem de coagulante (60 mg/L de sulfato de Alumínio) realizada no tempo de 40 segundos (operando com gradiente de 1.000 s^{-1} por 10 segundos para realizar a mistura rápida e 45 s^{-1} para mistura lenta e formação dos flocos), quebra dos flocos realizada em 740 e 1.050 segundos com tempo de quebra de 10 segundos (gradiente de 900 s^{-1}).

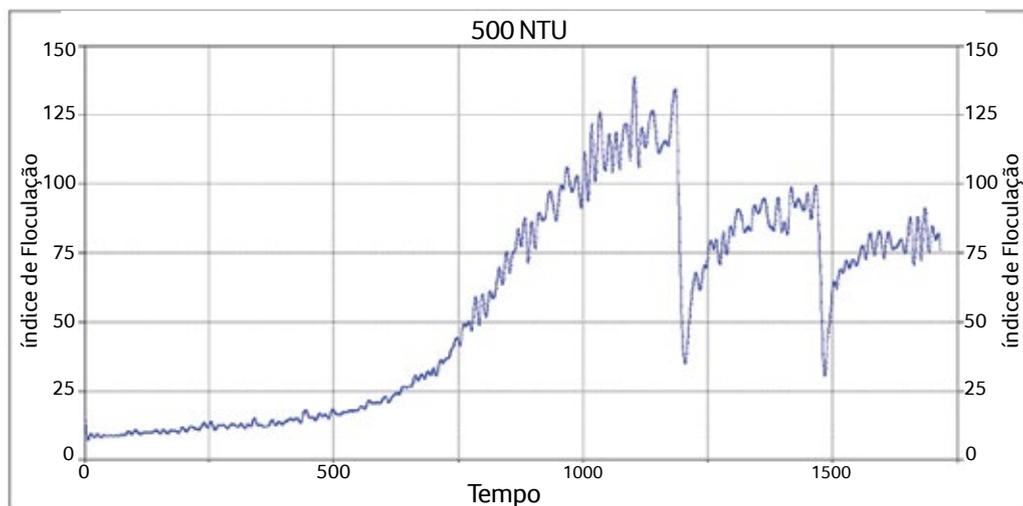


Figura 6 - Teste realizado com turbidez de 500 NTU, dosagem de coagulante (70 mg/L de sulfato de alumínio) realizada no tempo de 40 segundos (operando com gradiente de 1.000 s^{-1} por 10 segundos para realizar a mistura rápida e 45 s^{-1} para mistura lenta e formação dos flocos), quebra dos flocos realizada em 1.180 e 1.470 segundos com tempo de quebra de 10 segundos (gradiente de 900 s^{-1}).

apenas a passagem de sinais cujas frequências sejam inferiores à frequência de corte do filtro, ajustável por resistores e capacitores conectados ao amplificador. Assim, esses componentes são escolhidos de forma que a frequência de corte do filtro seja maior do que a frequência do sinal V_{AC} , de modo que esse sinal é preservado e os sinais de

frequências superiores, o ruído de alta frequência, são reduzidos.

OBTENÇÃO DA COMPONENTE RMS

A componente RMS da componente AC (V_{RMS}) é obtida por um circuito integrado específico que fornece o valor RMS real de um sinal de forma qual-

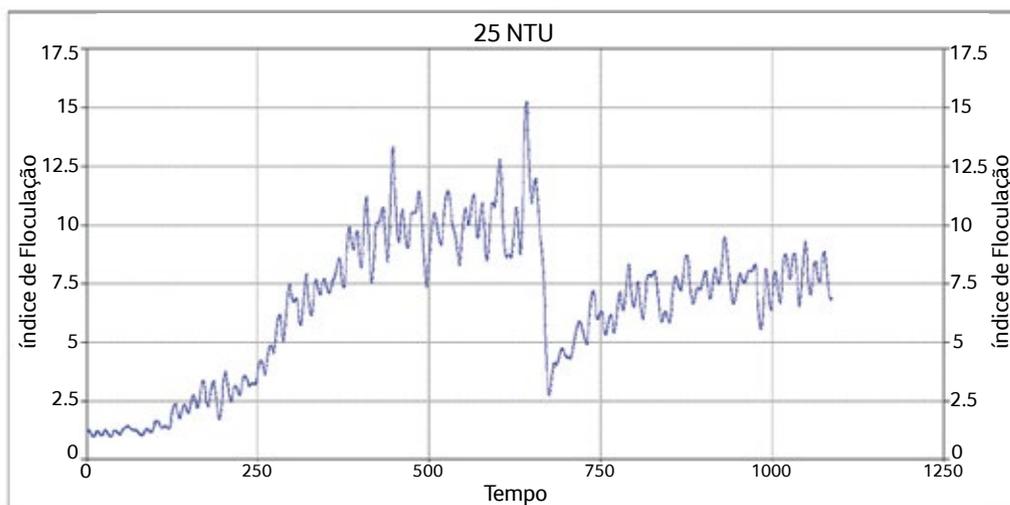


Figura 7 - Teste realizado com turbidez de 25 NTU, dosagem de coagulante (30 mg/L de sulfato de alumínio) realizada no tempo de 40 segundos (operando com gradiente de 1.000 s^{-1} por 10 segundos para realizar a mistura rápida e 45 s^{-1} para mistura lenta e formação dos flocos), quebra dos flocos realizada em 650 segundos com tempo de quebra de 10 segundos (gradiente de 900 s^{-1})

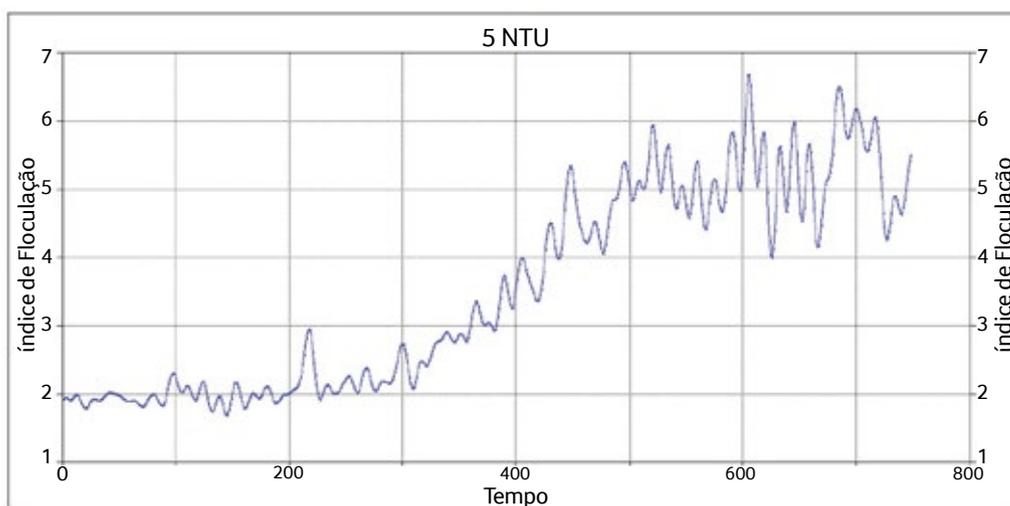


Figura 8 - Curva suavizada do teste realizado com turbidez de 5 NTU.

quer. O circuito integrado utilizado é um AD637. Para seu funcionamento, bastam a conexão com um capacitor externo (47u) e a alimentação.

Após o circuito eletrônico, é necessário um microcontrolador, sendo empregado, nesse caso, um ATmega328, contido em uma placa de prototipagem nacional do tipo Arduino, denominada Tatuino 16k.

Para explicar a necessidade de um microcontrolador, pode-se dizer que, ao final do circuito, é emitido um sinal analógico, que, para ser enviado ao computador pessoal, precisa ser transformado em digital. Com o sinal digital, são elaborados gráficos, bem como são realizadas as análises dos dados obtidos. O sinal digital pode ainda ser tratado via *software* por processamento digital, de

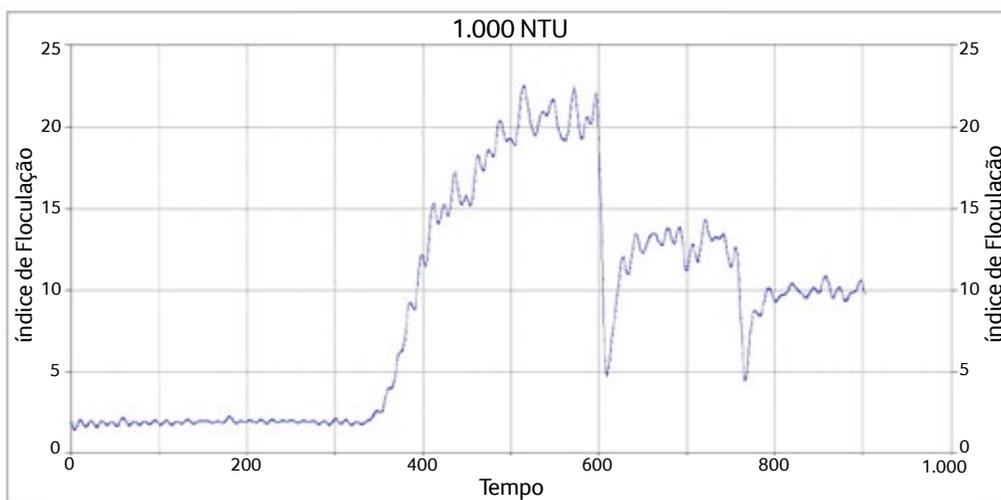


Figura 9 - Curva suavizada do teste realizado com turbidez de 1.000 NTU.

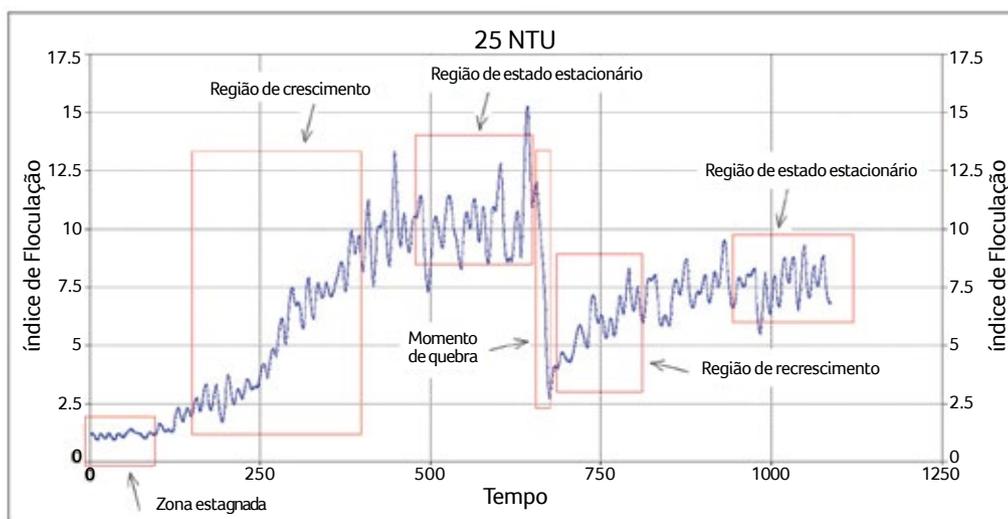


Figura 10 - Demarcados momentos gráficos principais na curva de 25 NTU obtida no presente trabalho.

modo que os dados podem ser melhor apresentados graficamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o estabelecimento do correto funcionamento do sistema eletrônico, realizou-se ajuste por meio do potenciômetro na intensidade de luz emitida,

pois é necessário determinar o nível de intensidade ótimo para captação de bons resultados. A intensidade luminosa não apresentou problemas; quando descoberta a intensidade ótima (1,16 V, em termos de tensão no emissor, ou 18,5%, em termos da intensidade máxima), esta se apresentou eficaz em todas as análises.

O equipamento (protótipo) montado demonstrou total eficácia quanto aos resultados esperados, alcançando seu objetivo no que tange ao monitoramento contínuo da floculação, fornecendo gráficos consistentes e com precisão compatível (Figuras 5 a 9), corroborando sua total aplicabilidade nos testes de monitoramento do crescimento dos flocos – conforme observado nos estudos de Jarvis et al. (2005), Gregory e Nelson (1986), Gregory e Rossi (2001), Kornboonraksa et al. (2009), entre outros.

As menores faixas de turbidez da água de estudo demonstraram resultados com maior variação e menor precisão (Figura 7) que os dados com as águas de estudo de maiores valores de turbidez. Isso se deve ao fato de uma maior turbidez formar mais flocos. Ademais, por meio de um microcontrolador com conversor analógico-digital de maior definição e com melhoramento do processamento digital do sinal, são esperados resultados com maior precisão e menor variação, respectivamente.

Os testes contemplaram amostras com faixa de turbidez de 5 NTU (Figura 8) a 1.000 NTU (Figura 9). Assim como citado no parágrafo anterior, é possível visualizar maior precisão e menor variação em gráficos de maior turbidez.

O teste realizado com a água de turbidez de 5 NTU (Figura 8) mostra a típica curva de crescimento dos flocos, indicando, próximo dos 300 segundos, o princípio do crescimento e chegando à estabilidade por volta dos 500 segundos.

A Figura 9 contém os resultados obtidos a partir da água mais turva que foi testada (1.000 NTU), atingindo o platô inicial um IF duas vezes maior que após a segunda quebra.

Os testes de outras faixas de turbidez encontram-se de forma completa e mais detalhada na dissertação completa deste trabalho (RIBAS, 2013).

O gráfico da Figura 10 apresenta características já esperadas, assim como os obtidos no presente projeto (Figuras 5 a 9). Inicialmente, tem-se uma zona

estagnada, em que ainda não se deu início à floculação ou, pelo menos, ainda não foi evidenciado o crescimento dos flocos; em um segundo momento, tem-se a região de crescimento, em que a aglutinação das partículas formará os flocos, cunhando uma curva ascendente; no momento no qual os flocos já se formaram e não tendem mais a crescer, atinge-se o estado estacionário, formando um platô; ao atingir o platô, a amostra é submetida a uma intensa agitação, com o intuito de causar a ruptura dos flocos, constituindo o momento de quebra; após a quebra, o processo se reinicia, formando novamente uma curva ascendente, indicando o recrescimento dos flocos até atingir, em um momento final, novamente o estado estacionário. O processo de quebra pode ser realizado quantas vezes se desejar, variando de acordo com o objetivo da pesquisa.

Baseando-se nesse modelo gráfico, variam-se as dosagens de coagulantes e pH das soluções, a fim de comparar os resultados finais plotados graficamente. Ao observar as curvas de crescimento e recrescimento dos flocos, chega-se à conclusão de qual dosagem e condição de pH são mais factíveis ao objetivo final.

Na Figura 10, podem-se observar todos os momentos nos quais ocorrem floculação e quebra dos flocos. A diferença deste para os outros gráficos obtidos na mesma pesquisa fica por conta das características diferentes da água de estudo, coagulantes, gradientes de velocidades, entre outros parâmetros adotados. No entanto, o importante a ser analisado é a característica que as curvas demonstram.

Se analisados todos os outros gráficos exibidos anteriormente neste item, é visível a semelhança entre elas. Essa é a característica gráfica esperada de uma amostra floculada e submetida à quebra, empregando o equipamento proposto no monitoramento.

A possibilidade do desenvolvimento de um equipamento com a aquisição de componentes realizada somente em território nacional se demonstrou factível e viável (custo total de aproximadamente R\$ 500,00), uma vez que seu preço final equivale a uma fração (2,5%) do preço do equipamento comercializado na Inglaterra (R\$ 20.000,00, já inclusas taxas de importação e aplicando cotação de libra esterlina de R\$ 3,60).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Por meio da utilização do protótipo desenvolvido, foi possível melhor avaliar os efeitos de crescimento e recrescimento dos flocos (Figuras 5 a 9), bem como fazer uma excelente análise da dosagem e do tipo de coagulante empregados.

No sentido de aprimorar o equipamento para estudos futuros, sugere-se o emprego de microcontrolador com melhores recursos, no sentido de aprimorar tanto a conversão do sinal analógico em digital, o que se traduz em melhor precisão dos dados, quanto o processamento digital, que pode implicar menor variação do sinal. Apesar do encarecimento do equipamento pelo uso de *hardware* para tratamento do sinal no lugar de circuitos analógicos adicionais, concluiu-se que isso é válido, levando em consideração a vantagem de maior facilidade de implementação de funções via *software* e de apresentação de resultados graficamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), financiadoras deste projeto de pesquisa, por meio do Edital FAPESP/SABESP (Processo 2010/50694-0), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa de mestrado ao segundo autor

e à Fapesp (Processo 2011/22560-2) pela bolsa de iniciação científica ao terceiro autor.

REFERÊNCIAS

- ARBOLEDA V., J. **Teoría y práctica de la purificación del agua**. 3 ed. Colômbia, ACODAL, McGraw-Hill, 793 p. 2000.
- CHENG, W. P.; CHANG, J. N.; CHEN, P. H.; YU, R. F.; HUANG, Y. W. **Turbidity fluctuation as a measure of floc size in a coagulation pilot study**. *Desalination and water treatment*. v. 30, p. 98-104, 2011.
- CUMMINS, P. G., STAPLES, E. J.; THOMPSON, L. G.; SMITH, A. L.; POPE, L. **Size distribution measurements of nonaggregating and aggregating dispersions using a modified flow ultramicroscope**. *J. Colloid Interface Sci.* v. 92, p. 189-197, 1983.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. RiMA, 2ª ed., 1565p. 2005.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. LDiBe, São Carlos, 2011.
- EDZWALD, J.K.; **Water Quality and Treatment**. 6th Edition. New York: McGraw-Hill. 1686p. 2011.
- GIBBS, A.; PELTON, R. **Effect of PEO molecular weight on the flocculation and resultant floc properties of polymer-induced PCC flocs**. *Journal of Pulp and Paper Science*, v.25 (7), p.267-271. 1999.
- GREGORY, J. **Turbidity fluctuations in flowing suspensions**. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.105, n.2, p. 357-371, 1985.
- GREGORY, J.; NELSON, D.W. **A new optical method for flocculation monitoring**. In: J. Gregory (Ed.), *Solid-Liquid Separation*, Ellis Horwood, Chichester, p. 172-182, 1984.
- GREGORY, J. **Monitoring particle aggregation processes**. *Advances in Colloids and Interface Science*. Elsevier B.V. v. 147-148, p.109-123, 2009.
- GREGORY, J.; NELSON, D.W. **Monitoring of aggregates in flowing suspensions**. *Colloids and Surfaces*, v.18, p.175-188, 1986.
- GREGORY, J.; ROSSI, L. **Dynamic testing of water treatment coagulants**. *Water Science and Technology*. v.1(4), p.65-72, 2001.
- HO L.; BRAUN K.; FABRIS R.; HOEFEL D.; MORRAN J.; MONIS P.; DRIKAS M. **Comparison of drinking water treatment process streams for optimal bacteriological water quality**. *Water Research*. v. 46. p. 3934-3942. 2012.
- JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; PARSONS, S.A. **Breakage, Regrowth, and Fractal Nature of Natural Organic Matter Flocs**. *Environmental Science and Technology*, v.39(7), p.2307-2314, 2005.
- JECKEL, M. R. GWF. **Wasser/Abwasser**, 123, p.555, 1982.

JIN, P.K.K.; WANG, X.C.C.; CHAI, H.X. **Evaluation of floc strength by morphological analysis and PDA online monitoring.** *Water Science and Technology*, v.56 (10), p.117-124, 2007.

KIM, S. G.; CHOI, K. J.; YU, P. J.; KIM, S. H.; LEE, Y. D. **Evaluation of mixing conditions using an on-line monitoring technique.** *Korean Journal of Chemical Engineering*, v.25 (1), p.19-24, 2008.

KORNBOONRAKSA, T.; LEE, S.; LEE S.; LEE, H. **On-line monitoring of floc formation in various flocculants for piggery wastewater treatment.** *Desalination and Water Treatment*, v.1, p.248-258, 2009.

LIANG, H.; NAN, J.; ZHANG, X.; CHEN, Z.; TIAN, J.; LI, G. **A novel on-line optical method for algae measurement.** *Society of Chemical Industry*, v.85, p.1413-1418, 2010.

MATTHEWS, B. A.; RHODES, B. **Studies of the coagulation kinetics of mixed suspensions.** *J. Colloid and Interface Science*, 32, p.332-338, 1970.

NGUYEN, T. P.; HANKINS, N. P.; HILAL, N. **A comparative study of the flocculation behaviour and final properties of synthetic and activated sludge in wastewater treatment.** *Desalination and Water Treatment*, v.204 (1-3), p.277-295, 2007.

QASIM, S.R.; MOTLEY, E. M.; ZHU, G. **Water works engineering: planning, desing & operation. USA: Prentice Hall PTR**, p. 844. 2000.

RAHMANI, N. H. G.; DABROS, T.; MASLIYAH, J. H. **Online optical monitoring of asphaltene aggregation.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v.44 (1), p.75-84. 2005.

RIBAS, A. B.; **Desenvolvimento de equipamento para monitoramento contínuo da floculação.** 2013. 179 p. Dissertação de mestrado em Infraestrutura Aeronáutica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

STAAKS, C.; FABRIS, R.; LOWE, T.; CHOW, C. W. K.; VAN LEEUWEN, J. A.; DRIKAS, M. **Coagulation assessment and optimization with a photometric dispersion analyser and organic characterization for**

natural organic matter removal performance. *Chemical Engineering Journal*. v.168, p. 629-634, 2011.

WALSH, D. J.; ANDERSON, J.; PARKER, A.; DIX, M. J. **A flow ultramicroscope for particle counting and size distribution analysis.** *Colloid and Polymer Science*, v. 259, p. 1003-1009, 1981.

YUKSELEN, M.A.; GREGORY, J. **The reversibility of floc breakage.** *Journal of Mineral Processing*. v.73, p.251-259, 2004.

ANEXO

Lista de símbolos e abreviações

ETA	Estação de Tratamento de Água
AC	Corrente variável
CD	Corrente contínua
nm	Nanômetro
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
V_{CELL}	Sinal de entrada
V_{DC}	Sinal de corrente contínua
V_{AC}	Sinal de corrente alternada
$V_{AC'}$	Sinal de corrente alternada após redução de ruído
V_{RMS}	Sinal de valor RMS de VAC
V	Volt
k	Quilo-ohm
u	Microfarad
16K	16 kilobytes de memória
Φ	Diâmetro
(Φ_i) e (Φ_e)	Diâmetros interno e externo
(λ)	Comprimento de onda