



# DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO BASEADO EM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA A PREDIÇÃO DA DOSAGEM DE COAGULANTE EM UM PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA POR FLOTAÇÃO

J. G. GABRIEL<sup>1</sup>, A. C. O. SOUZA<sup>1</sup>, F. V. SILVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual em Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos

E-mail para contato: flavio@feq.unicamp.br

**RESUMO** – Essencial a todas as formas de vida, a água é um importantíssimo recurso natural do planeta Terra. Sua grande demanda, aliada ao seu uso irracional, fazem com que metodologias eficientes para o tratamento desse recurso sejam necessárias. Nesse contexto, as etapas de coagulação e floculação exercem um papel fundamental nas Estação de Tratamento de Águas, uma vez que estas preparam a água bruta para a aplicação do processo de clarificação seguinte (como a flotação por ar dissolvido, por exemplo). Neste projeto, foi desenvolvido um modelo matemático empírico baseado em redes neurais artificiais capaz de prever a dosagem ideal do agente coagulante e do agente floculante que deve ser aplicada no estágio de coagulação e floculação de um protótipo de flotação por ar dissolvido (FAD). O modelo obtido apresentou comportamento satisfatório e elevado coeficiente de correlação igual a  $r=0,98$ , além de ter se mostrado mais eficiente que o modelo de ajuste linear aplicado aos dados experimentais ( $r=0,94$ ). Assim, o modelo pôde ser considerado uma ferramenta bastante útil e prática, que reduz a necessidade de realização de testes de jarro para a execução de ensaios no protótipo de FAD durante a utilização de efluentes de mistura de água e sabão.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural não renovável indispensável à sobrevivência de todas as formas de vida e ao desenvolvimento de qualquer sociedade, pois está diretamente associada a importantes setores da economia, como a agricultura e o meio industrial. Desta forma, os crescimentos populacional e econômico no mundo têm impacto direto na demanda deste recurso, o que faz com que o uso racional, a proteção e o tratamento de água se tornem atividades imprescindíveis.

Sendo assim, cada país estabelece leis, portarias e resoluções que fornecem diretrizes e regulamentam os processos de tratamento de água para abastecimento público e de tratamento dos efluentes gerados pelas atividades industriais. Nesse contexto, a flotação por ar dissolvido consiste em um método de separação física que tem ganhado bastante destaque nos últimos tempos e pode ser aplicada tanto em Estações de Tratamento de Água (ETAs), na etapa de

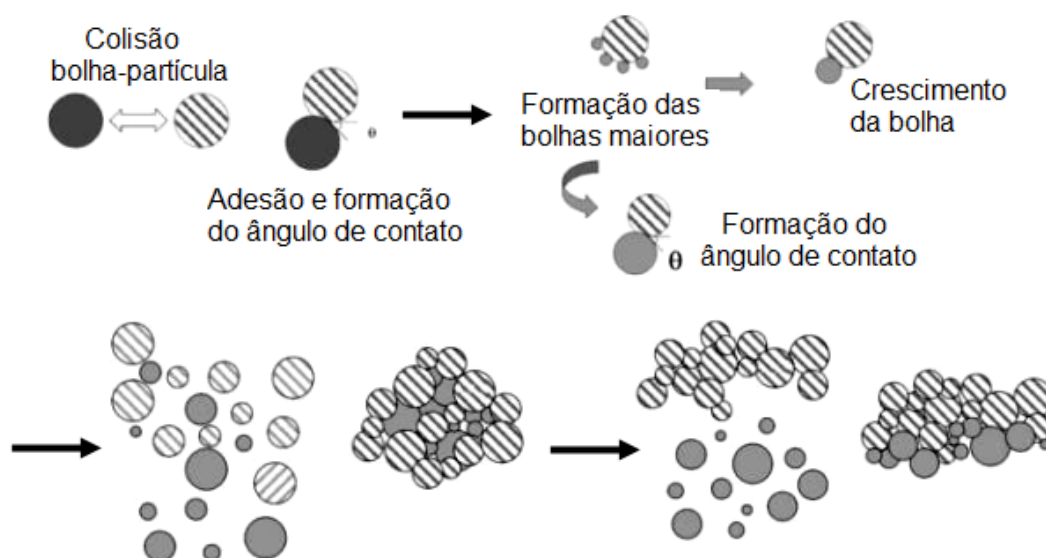
clarificação, quanto em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), no estágio de adensamento do lodo produzido (RICHTER, 2009).

## 1.1. Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

O processo de flotação por ar dissolvido consiste na promoção dos fenômenos de colisão e adesão entre pequenas bolhas de ar e o material em suspensão presente na água bruta/efluente em tratamento, o que resulta na formação de agregados partícula-bolha. Estes possuem densidade aparente menor que a da água e, portanto, ascendem até a superfície do tanque de flotação de onde podem ser facilmente removidos.

A Figura 1 ilustra o processo de adesão das microbolhas às partículas sólidas suspensas. É possível observar que, primeiramente, ocorre uma colisão microbolha-partícula, que precede a adesão de ambas. Formam-se então microbolhas maiores a partir da junção das microbolhas menores e as partículas sólidas vão sendo aprisionadas em agregados, que, com menor densidade aparente, são arrastados para a superfície do flotador (SILVESTRE, 2018).

Figura 1 – Mecanismo de adesão de microbolhas em partículas sólidas (Adaptado de SILVESTRE, 2018).



Para que o processo de FAD seja eficiente, o efluente a ser tratado passa por um pré-tratamento químico, que consiste em duas etapas distintas: a coagulação e a floculação. Na primeira, é adicionado um agente coagulante responsável por precipitar as substâncias dissolvidas nos efluentes, as quais se agregam em pequenos flocos. Na segunda etapa, é adicionado um agente floculante, capaz de agregar os pequenos flocos em flocos maiores, possibilitando maior adesão das microbolhas do processo de flotação (BICKERTON, 2012).

O agente coagulante e o agente floculante são dosados em quantidades determinadas a partir de ensaios de teste de jarros (*jar tests*). Estes são ensaios de bancada que devem ser constantemente realizados devido à alta variabilidade dos valores de turbidez dos efluentes tratados (SILVESTRE, 2018). Portanto, a padronização da qualidade do efluente tratado em

processo contínuo é bastante prejudicada, o que faz com que métodos de predição *online* das dosagens ideais dos reagentes utilizados no pré-tratamento se tornem necessários. Nesse contexto, por se tratar de um sistema não linear complexo, processos de FAD podem ser caracterizados a partir de modelos baseados em inteligência artificial (Shean e Cilliers, 2011), como aqueles desenvolvidos por meio de redes neurais artificiais.

## 1.2. Inteligência Artificial: Redes Neurais Artificiais (RNA)

As redes neurais artificiais (RNA) são modelos matemáticos capazes de aprender a partir de uma base de dados fornecida e generalizar o conhecimento adquirido, caracterizando um sistema inteligente. No neurônio artificial, os sinais de entrada recebidos são ponderados por pesos e processados em funções matemáticas, gerando um sinal de saída que pode ser transferido a outro neurônio ou gerar uma saída final. (SILVA et al., 2010).

Neste projeto, um modelo matemático baseado em redes neurais artificiais foi desenvolvido, com o objetivo de prever, em tempo real, a dosagem ideal de coagulante que deve ser adicionada a um sistema de tratamento de água por flotação por ar dissolvido, dependendo da turbidez inicial da água bruta.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Teste de Jarros

Para criar uma base de dados adequada para o treinamento e posterior validação do modelo matemático desenvolvido, foram realizados 17 testes de jarros com diferentes valores de turbidez da água a ser tratada, com valores que variaram de 5 a 100 NTU. A turbidez foi a propriedade de análise escolhida, pois este é um dos parâmetros utilizado pelos órgãos reguladores brasileiros para verificar os padrões de potabilidade da água tratada.

Primeiramente, foi realizada a preparação do efluente com a turbidez desejada. Para isso, adicionou-se saibro, um tipo de areia grossa, a 8 litros de água. O sobrenadante da mistura era então transferido para outro recipiente de agitação mecânica contínua e a areia residual era descartada. Depois, 500 mL do efluente foram colocados em 6 jarros agitados mecanicamente e mediu-se o pH inicial da solução. Adicionou-se então uma mesma quantidade de aluminato de sódio 2% v/v (coagulante) em todos os jarros e agitou-se a mistura com uma frequência de 150 rpm durante 2 minutos. Após esse tempo, mediu-se o pH de cada jarro e adicionou-se uma quantidade diferente de tanino 5% v/v (floculante) em cada um deles. Após 5 minutos de agitação mais lenta, a uma frequência de 50 rpm para não prejudicar a formação de flocos, mediu-se novamente o pH da solução e desligou-se a agitação. Após 10 minutos sem agitação, mediu-se a turbidez final das soluções e depois as mesmas foram descartadas.

O procedimento acima foi repetido, porém com quantidades variáveis de coagulante adicionado e com a quantidade de tanino fixada, tomando como base a quantidade adicionada desse floculante na solução em que se obteve menor turbidez final. Após o segundo procedimento, as quantidades de coagulante e floculante adicionadas à solução que obteve

menor turbidez final foram tomadas como ideais para o tratamento de água com a respectiva turbidez inicial.

## 2.2. Desenvolvimento do Modelo Matemático Baseado em RNA

Para o desenvolvimento do modelo matemático, os 17 dados de turbidez inicial da água e de volume de coagulante adicionado a ela foram inseridos no *software* MATLAB® e todos os valores foram normalizados para garantir melhor eficiência do método aplicado. Três desses pontos foram retirados para serem utilizados como teste do modelo e o restante foi utilizado no treinamento das redes.

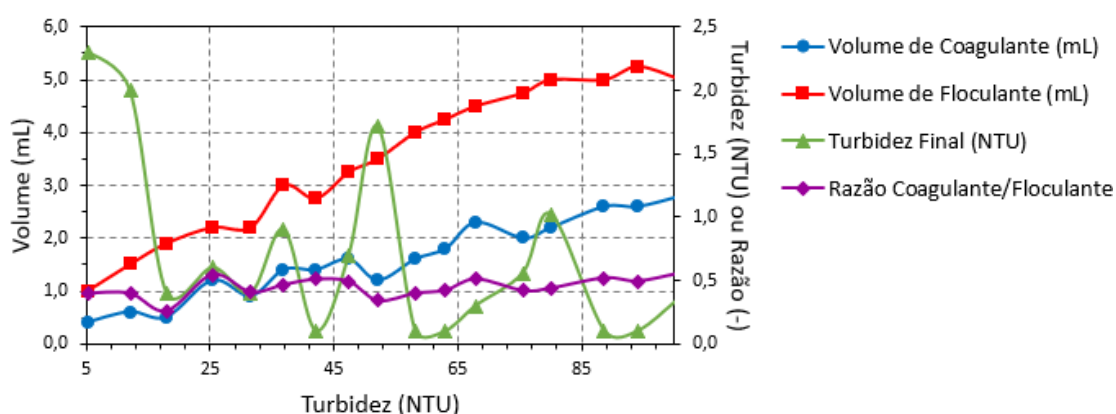
No MATLAB®, escolheu-se o número de neurônios desejados na primeira camada na rede neural e treinou-se a mesma, a qual foi testada logo depois. Para minimizar os erros do treinamento e do teste, a rede foi retreinada e o número de neurônios foi variado, sendo esse processo repetido até que o modelo obtido tivesse um coeficiente de correlação próximo de 1 e que a diferença entre o volume de coagulante predito e o volume medido experimentalmente fosse, no máximo, igual 0,5 mL.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Teste de Jarros

Os resultados obtidos nos ensaios de teste de jarros são ilustrados pelo gráfico contido na Figura 2.

Figura 2 – Resultados obtidos nos testes de jarros com relação aos volumes de coagulante e floculante.



Analisando-se a Figura 2 é possível observar que os volumes de coagulante e floculante requeridos para o tratamento da água aumentam com a turbidez da mesma, como o esperado. Além disso, é importante ressaltar que a razão entre o volume de coagulante e floculante se manteve praticamente constante (aproximadamente 0,45), o que faz com que seja necessário prever apenas um deles e, com o resultado, calcula-se o outro. Os valores de turbidez final apresentaram bastante variação, o que pode ser explicado pela rápida mudança dessa variável

no tempo em que as amostras eram coletadas e pela dificuldade da mesma em permanecer estável em um valor constante.

### 3.2. Modelo Matemático Baseado em RNA

A partir do modelo matemático desenvolvido no MATLAB®, foi gerado um diagrama correspondente no Simulink (*toolbox* do MATLAB®), cuja entrada é o valor de turbidez inicial da água e a saída é o volume de coagulante necessário no processo de FAD.

A arquitetura da rede neural construída é composta por duas camadas, sendo que a primeira camada é constituída de 3 neurônios, enquanto que a segunda é constituída de apenas um, que é o neurônio responsável por gerar o sinal de saída da rede.

Na Figura 3 está apresentada uma comparação entre os dados experimentais (reais) e o modelo matemático baseado em RNA e, na Figura 4, é apresentado um ajuste linear dos dados experimentais.

Figura 3 - Comparação entre os dados experimentais e o modelo matemático desenvolvido.

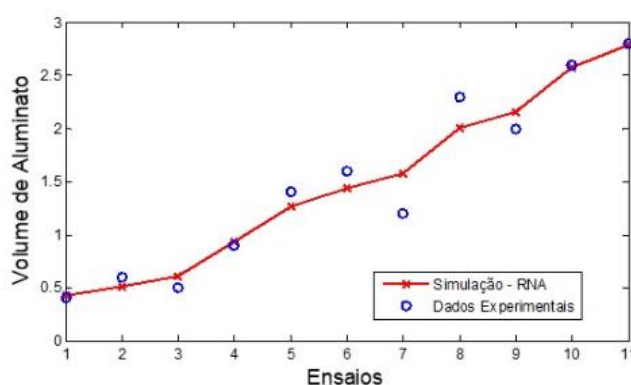
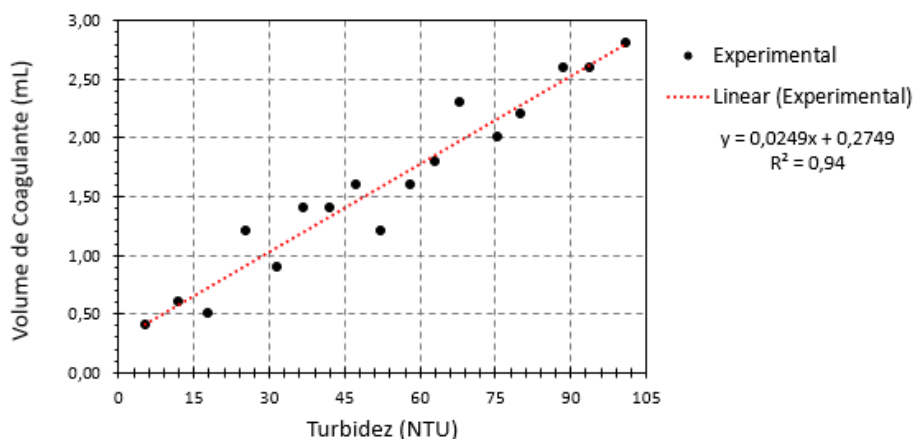


Figura 4 - Ajuste linear dos dados experimentais.



O modelo empírico obtido apresentou coeficiente de correlação igual a  $r=0,98$  e é possível observar na Figura 3 que o modelo matemático seguiu a mesma tendência dos dados experimentais. Desta forma, considerando a imprecisão das medidas e que aproximadamente 20% dos dados (três valores) foram utilizados apenas na fase de teste e não para o treinamento da rede, o modelo desenvolvido se ajustou aos dados experimentais de forma bastante satisfatória, sendo, portanto, adequado para prever a dosagem dos agentes coagulante e floculante a partir do valor de turbidez inicial apresentado pela água bruta. Por fim, o maior coeficiente de correlação obtido pelo modelo em relação ao ajuste linear ratifica o melhor desempenho da inteligência artificial em sistemas não lineares.

#### 4. CONCLUSÃO

Nos ensaios de testes de jarros, foram obtidos dados experimentais consistentes, já que os valores de volumes de coagulante e floculante aumentaram com a turbidez inicial do efluente, conforme o esperado. Além disso, a proporção entre os volumes experimentais de coagulante e floculante obtidos se manteve praticamente constante em todo o experimento, de forma que, a partir da predição da dosagem de coagulante, tem-se também a dosagem ideal de floculante. Por fim, o modelo matemático baseado em RNA proposto se mostrou mais eficiente que o ajuste linear aplicado aos dados experimentais e pode, portanto, ser utilizado como importante ferramenta na predição do volume de coagulante a ser utilizado em um processo de FAD de efluentes compostos por uma mistura de água e saibro, o que, além de otimizar o processo, minimiza a demanda desse reagente.

#### 5. REFERÊNCIAS

- BARBOSA, A. H.; FREITAS, M. S. R.; NEVES, F. A. Confiabilidade Estrutural Utilizando o Método de Monte Carlo e Redes Neurais, 2005. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.
- BICKERTON, B. J. Optimization of dissolved air flotation for drinking water treatment, 2012. Dalhousie University.
- RICHTER, C. A. *Água: Métodos e tecnologia de tratamento*. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2009.
- SHEAN, B. J.; CILLIERS, J. J. A review of froth flotation control. *International Journal of Mineral Processing*, v. 100, n. 3–4, p. 57–71, 2011.
- SILVA, I. N. DA; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. *Redes neurais Artificiais Para Engenharia e Ciências Aplicadas - Fundamentos Teóricos e Aspectos Práticos*. 2 ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2010.
- SILVESTRE, C. F. Determinação das condições operacionais em uma planta piloto de Flotação por Ar Dissolvido, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.