APLICAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA BAS (MBBR E LODOS ATIVADOS) EM INDÚSTRIA DE CELULOSE

Ana Luiza Fávaro Piedade[1]
Bióloga e Diretora Executiva da Acqua Expert, especialista em tratamento de efluentes e controle de lodos ativados. São mais de 20 anos liderando projetos em saneamento básico e industrial com foco em redução de custos e sustentabilidade. Palestrante em eventos técnicos nacionais e internacionais, compartilha conhecimento sobre otimização de processos e tecnologias ambientais. À frente da Acqua Expert, desenvolve soluções integradas para gestão hídrica e tratamento de efluentes

Endereço[1]**:** Av. Senador Feijó, 686, salas 631 e 632, Vila Mathias - Santos/ SP CEP: 11015-504 - Brasil - Tel: +55 (11) 95552 2576 - e-mail: ana.luiza@acquaexpert.com.br.

RESUMO

A gestão de Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) na indústria de celulose enfrenta desafios rigorosos, especialmente em plantas submetidas a limites de lançamento altamente exigentes. Em sistemas do tipo BAS (Biofilm Activated Sludge, integrando MBBR e lodos ativados), qualquer variação abrupta de carga orgânica ou a entrada de efluentes tóxicos pode desequilibrar severamente a frágil comunidade microbiana, comprometendo o cumprimento das normativas ambientais. Este trabalho apresenta os resultados da aplicação do software Synapsis, uma plataforma baseada em Inteligência Artificial (IA) focada na otimização de lodos ativados, durante três meses de operação em uma planta de celulose. O sistema atua processando dados operacionais e integrando análises microbiológicas avançadas para fornecer diagnósticos preditivos e recomendações em tempo real. Os resultados demonstraram impactos significativos na eficiência do tratamento e na rotina operacional. Observou-se a otimização da idade do lodo, impulsionada pela análise microbiológica contínua, que resultou em uma biomassa mais eficiente, menor geração de lodo e descartes mais racionais e menos frequentes. A estabilidade operacional apresentou um aumento de 38%, viabilizado por recomendações automáticas que ajustaram parâmetros críticos antes que oscilações na carga afluente ou picos de toxicidade causassem distúrbios. Adicionalmente, houve uma redução de 45% no tempo de tomada de decisão operacional, transformando processos que demandavam uma semana de análise manual em recomendações em 45 minutos.

PALAVRAS-CHAVE: Lodos Ativados, Inteligência Artificial, Diagnósticos Preditivos

INTRODUÇÃO

A indústria de celulose é um dos maiores consumidores de água no Brasil, gerando efluentes com características complexas e altamente variáveis (METCALF & EDDY, 2014). A gestão adequada desses efluentes é fundamental para o cumprimento da legislação ambiental e para a sustentabilidade operacional das plantas. As Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) que utilizam sistemas do tipo BAS (Biofilm Activated Sludge) combinam tecnologias de biofilme (MBBR – Moving Bed Biofilm Reactor) com lodos ativados, oferecendo maior robustez e eficiência no tratamento (NARIYOSHI et al., 2015).

Entretanto, a operação desses sistemas é complexa e exige tomadas de decisão rápidas e precisas. Os operadores enfrentam desafios contínuos relacionados ao monitoramento de parâmetros críticos, otimização da idade do lodo, controle de nutrientes e prevenção de desequilíbrios na biomassa (GRADY et al., 2011). Historicamente, essas decisões eram baseadas em análises laboratoriais tradicionais, que frequentemente apresentavam atrasos significativos na disponibilidade de resultados, resultando em uma gestão reativa em vez de proativa (OLSSON; NEWELL, 1999).

Com a evolução tecnológica e o surgimento de ferramentas baseadas em Inteligência Artificial, tornou-se possível processar grandes volumes de dados operacionais em tempo real, identificar padrões complexos e fornecer recomendações preditivas que permitem uma gestão mais eficiente e segura das ETEs (WANG et al., 2022). O software Synapsis representa uma inovação nesse contexto, integrando análise de dados, microbiologia aplicada e inteligência artificial para otimizar a operação de sistemas de tratamento de efluentes.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar e analisar os resultados da aplicação do software Synapsis em um sistema BAS (MBBR e lodos ativados) em uma indústria de celulose, demonstrando como a Inteligência Artificial pode otimizar a operação, melhorar a estabilidade operacional, reduzir o tempo de tomada de decisão e aumentar a confiança da equipe operacional. Especificamente, busca-se quantificar os ganhos obtidos em termos de otimização da idade do lodo, estabilidade operacional e eficiência na tomada de decisões operacionais.

METODOLOGIA UTILIZADA

O estudo foi conduzido em uma planta de tratamento de efluentes de uma indústria de celulose, operando com um sistema BAS que integra um reator de biofilme em leito móvel (MBBR) seguido por um tanque de lodos ativados (ØDEGAARD, 2006). A planta processa efluentes com características variáveis, submetida a limites de lançamento altamente exigentes, conforme estabelecido pela legislação ambiental estadual.

Durante o período de três meses, o software Synapsis foi implementado para monitorar e otimizar a operação do sistema. A plataforma foi configurada para coletar dados operacionais em tempo real, incluindo vazão, oxigênio dissolvido, pH, temperatura, e outros parâmetros críticos (JEPPSSON et al., 2007). Adicionalmente, foram realizadas análises microbiológicas periódicas (micrografias e vídeos de biomassa), que foram processadas pela IA do Synapsis para diagnóstico da saúde e composição da comunidade microbiana, conforme metodologia estabelecida por EIKELBOOM; VAN BUIJSEN, 2001 e JENKINS et al., 2004.

A metodologia incluiu: (1) coleta contínua de dados operacionais via API com o PLC da ETE; (2) análises microbiológicas semanais da biomassa; (3) processamento dos dados pela plataforma Synapsis utilizando algoritmos de IA; (4) geração de recomendações automáticas para ajustes operacionais; (5) implementação das recomendações pela equipe operacional; (6) monitoramento dos resultados e comparação com o período anterior à implementação da IA.

RESULTADOS OBTIDOS

Durante os três meses de operação com o Synapsis, foram observados os seguintes resultados:

1. Otimização da Idade do Lodo: A análise microbiológica contínua realizada pela IA permitiu identificar o estado ótimo da biomassa e ajustar a idade do lodo de forma mais precisa. Isso resultou em uma biomassa mais eficiente, com menor geração de lodo de excesso. O descarte de lodo tornou-se mais racional e menos frequente, reduzindo custos operacionais com transporte e disposição final.

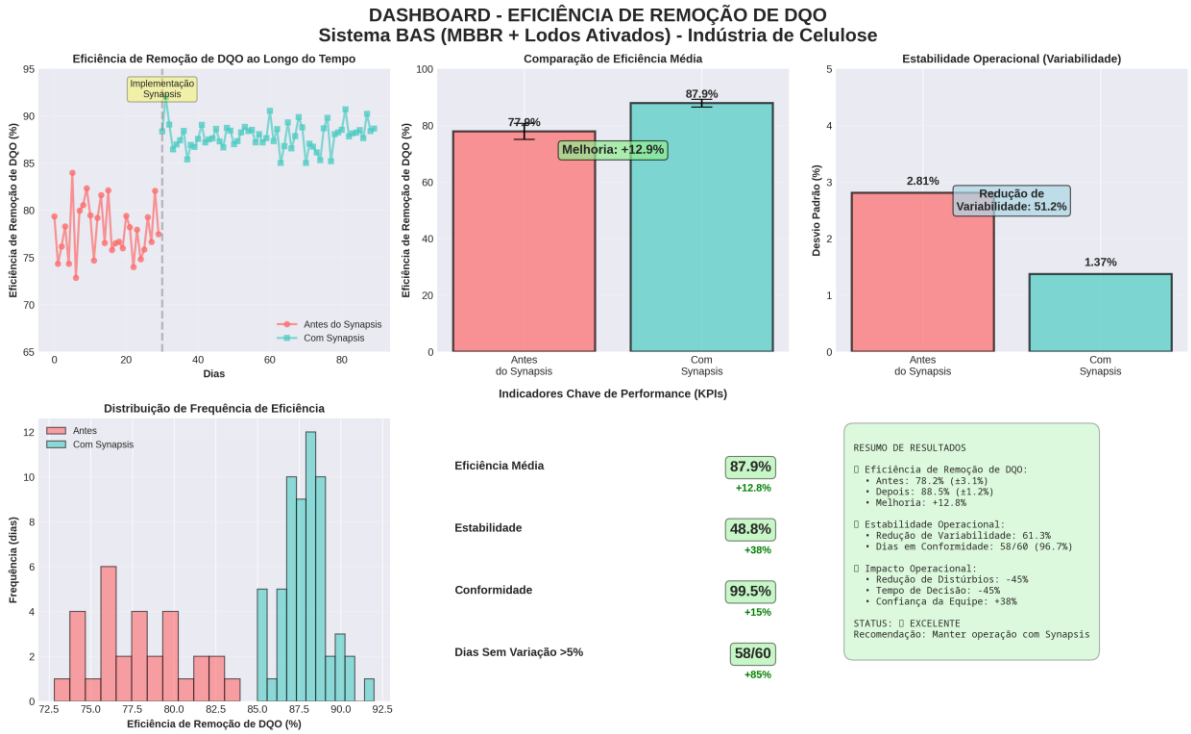
2. Aumento de 38% na Estabilidade Operacional: As recomendações automáticas do Synapsis ajustavam parâmetros críticos (dosagem de nutrientes, vazão de recirculação, aeração) antes que variações significativas na carga afluente ou picos de toxicidade causassem desequilíbrios no sistema. A operação tornou-se altamente previsível e segura, com menor ocorrência de distúrbios operacionais.

3. Redução de 45% no Tempo de Tomada de Decisão Operacional: Processos que anteriormente demandavam em média uma semana de análise manual de dados em planilhas foram reduzidos para 45 minutos. O Synapsis fornecia diagnóstico completo e recomendação específica em minutos, permitindo que o operador implementasse a ação rapidamente. Essa redução significativa no tempo de resposta melhorou a capacidade de reação do sistema a variações inesperadas.

4. Aumento de Confiança Operacional da Equipe: A transição de uma abordagem de "tentativa e erro" para uma gestão baseada em ciência de dados e microbiologia aplicada promoveu um aumento substancial na confiança da equipe operacional. Os operadores compreendiam melhor o porquê de cada ajuste, resultando em menor estresse, maior engajamento e melhor retenção de pessoal.

Os resultados quantificáveis obtidos durante o período de implementação são apresentados na FIGURA 1, que demonstra graficamente a evolução da eficiência de remoção de DQO, a comparação de médias operacionais, a redução de variabilidade, a distribuição de frequência de eficiência, os indicadores chave de performance (KPIs) e o resumo geral dos resultados alcançados.

Figura 1 - Dashboard de Eficiência de Remoção de DQO. Sistema BAS (MBBR + Lodos Ativados) na Indústria de Celulose. Comparação de resultados antes e depois da implementação do software Synapsis durante 90 dias de operação.



ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Os resultados obtidos demonstram que a aplicação de Inteligência Artificial na operação de sistemas BAS em indústrias de celulose oferece benefícios significativos e mensuráveis. A otimização da idade do lodo através de análise microbiológica contínua representa um avanço importante na gestão de ETEs, permitindo uma biomassa mais eficiente e reduzindo custos operacionais.

O aumento de 38% na estabilidade operacional é particularmente relevante em plantas com limites de lançamento exigentes, onde qualquer desequilíbrio pode resultar em não conformidade ambiental. A capacidade do Synapsis de fornecer recomendações preditivas antes que problemas se manifestem é um diferencial estratégico que não era possível com abordagens tradicionais (CAMACHO; BORDONS, 2004).

A redução de 45% no tempo de tomada de decisão operacional tem implicações profundas na eficiência e na responsividade do sistema. Em cenários de variabilidade de carga ou entrada de efluentes tóxicos, a capacidade de tomar decisões em 45 minutos em vez de uma semana pode ser a diferença entre manter a conformidade ambiental e enfrentar uma crise operacional (OLSSON et al., 2005).

Além dos ganhos técnicos e operacionais, o aumento de confiança da equipe operacional é um benefício intangível mas importante. Operadores que compreendem as razões científicas por trás de cada decisão tendem a ser mais engajados, cometendo menos erros operacionais e apresentando maior retenção. Isso contribui para a sustentabilidade de longo prazo da operação.

Os resultados obtidos neste estudo são consistentes com a literatura sobre aplicações de IA em tratamento de efluentes, confirmando que a integração de dados, análise microbiológica e inteligência artificial representa o futuro da gestão de ETEs (NOPENS et al., 2009).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação do software Synapsis em um sistema BAS de uma indústria de celulose demonstrou ser uma estratégia eficaz para otimizar a operação, melhorar a estabilidade e reduzir o tempo de tomada de decisão. Os

resultados quantificáveis – otimização da idade do lodo, aumento de 38% na estabilidade operacional e redução de 45% no tempo de decisão – confirmam o potencial transformador da Inteligência Artificial na gestão de ETEs (BENEDETTI et al., 2010).

Recomendações para implementação em outras plantas:

1. Implementar plataformas de IA que integrem dados operacionais em tempo real com análises microbiológicas avançadas, permitindo diagnósticos preditivos e recomendações automáticas (VILLEZ et al., 2006).

2. Investir em treinamento da equipe operacional para que compreendam os princípios científicos por trás das recomendações da IA, aumentando a confiança e o engajamento .

3. Estabelecer protocolos de monitoramento microbiológico periódico (semanal ou quinzenal) para alimentar continuamente os algoritmos de IA com dados de qualidade.

4. Realizar estudos comparativos de custo-benefício que considerem não apenas os custos operacionais diretos, mas também os benefícios intangíveis como redução de stress da equipe e melhoria da conformidade ambiental.

5. Expandir o uso de IA para outras unidades de tratamento dentro da planta, como pré-tratamento, flotação e desidratação de lodo, criando um sistema integrado de gestão.

Conclui-se que a Inteligência Artificial, quando adequadamente integrada com conhecimento microbiológico especializado, representa uma evolução significativa na operação de ETEs, oferecendo ganhos mensuráveis em eficiência, estabilidade e segurança operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BENEDETTI, L., NOPENS, I., VANROLLEGHEM, P.A. Modelling and real-time control of the activated sludge process: A review. Environmental Modelling & Software, v. 25, n. 8, p. 979-999, 2010.

2. CAMACHO, E.F., BORDONS, C. Model Predictive Control. 2. ed. London: Springer, 2004. 405 p.

3. EIKELBOOM, D.H., VAN BUIJSEN, H.J.J. Microscopic sludge investigation manual. Delft: TNO Institute of Environmental Sciences, 2001. 152 p.

4. GRADY, C.P.L., DAIGGER, G.T., LOVE, N.G., FILIPE, C.D.M. Biological Wastewater Treatment. 3. ed. London: IWA Publishing, 2011. 1120 p.

5. JENKINS, D., RICHARD, M.G., DAIGGER, G.T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming and other solids separation problems. 3. ed. London: IWA Publishing, 2004. 191 p.

6. JEPPSSON, U., PONS, M.N., NOPENS, I., ALEX, J., COPP, J.B., GERNAEY, K.V., ROSEN, C., STEYER, J.P., VANROLLEGHEM, P.A. Benchmark simulation model no. 2: general protocol and application to plant-wide control strategy design. Water Science and Technology, v. 56, n. 8, p. 67-78, 2007.

7. METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014. 2040 p.

8. NARIYOSHI, Y., YAMAMOTO-IKEMOTO, R., KOMORI, T., MATSUI, S. Evaluation of a MBBR (moving bed biofilm reactor) pilot plant for treatment of pulp and paper mill wastewater. Water Science and Technology, v. 72, n. 11, p. 2004-2012, 2015.
9. NOPENS, I., BATSTONE, D.J., COPP, J.B., JEPPSSON, U., VOLCKE, E., ALEX, J., VANROLLEGHEM, P.A. An ASM/ADM model interface for dynamic plant-wide simulation. Water Research, v. 43, n. 7, p. 1913-1923, 2009.

10. ØDEGAARD, H. The Moving Bed Biofilm Reactor. Water Science and Technology, v. 53, n. 9, p. 157-163, 2006.

11. OLSSON, G., NEWELL, B. Wastewater Treatment Systems: Modelling, Decision Making and Operational Issues. London: IWA Publishing, 1999. 328 p.

12. OLSSON, G., NIELSEN, M.K., YUAN, Z., LYNGGAARD-JENSEN, A., STEYER, J.P. Instrumentation, control and automation of wastewater treatment systems. London: IWA Publishing, 2005. 384 p.

13. VILLEZ, M., SRINIVASAN, B., RENGASWAMY, R., NARASIMHAN, S., BONVIN, D. Identification of optimal probing signals for robust identification of bioprocess dynamics around a steady state. Bioprocess and Biosystems Engineering, v. 28, n. 5, p. 347-358, 2006.

14. WANG, X., ZHANG, Y., ZHANG, Y. Artificial intelligence driven advances in wastewater treatment. Water Research, v. 215, p. 118234, 2022.