

321 - TECNOLOGIAS AVANÇADAS PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA: AUTOMAÇÃO, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E EFICIÊNCIA NO ABASTECIMENTO PÚBLICO

Gustavo Almeida Frata⁽¹⁾

Engenheiro Químico (UNIFRAN). Gestor Ambiental (Claretiano). Engenheiro de Segurança do Trabalho (Faculdades Pitágoras). Mestre e Doutor em Tecnologia Ambiental (UNAERP). Professor do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP).

Luciano Farias de Novaes⁽²⁾

Engenheiro Civil (UFV), Mestre em Recursos Hídricos e Ambientais (UFV) (2005) e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento (EESC-USP). Professor pesquisador da Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP).

Endereço⁽¹⁾: Rua São Joaquim, 550- São Carlos, São Paulo - 13560-300 - Brasil - Tel: +55 (16) 3419-0906 - e-mail: frata@novaes.eng.br;

RESUMO

A crescente demanda por água potável em um cenário de urbanização, industrialização e mudanças climáticas impulsiona a busca por soluções inovadoras no tratamento. Este artigo explora a aplicação de tecnologias avançadas, com foco em automação e inteligência artificial (IA), para aprimorar a eficiência, qualidade e sustentabilidade dos sistemas de abastecimento. A automação, através de sistemas de controle e monitoramento, evoluiu os processos de tratamento, enquanto a IA permite a análise de grandes volumes de dados em tempo real, previsão de falhas e tomada de decisões adaptativas. Estudos demonstram o potencial da IA na previsão da qualidade da água e na otimização de processos como coagulação e desinfecção. A automação, por sua vez, possibilita o monitoramento contínuo de parâmetros críticos. Apesar dos avanços, a adoção dessas tecnologias enfrenta desafios como a qualidade dos dados, altos custos de implementação e a necessidade de capacitação profissional. A pesquisa bibliográfica e exploratória analisou publicações recentes, identificando melhorias na remoção de contaminantes, redução de custos operacionais e aumento da eficiência energética em estudos de caso na França, Cingapura e China. Contudo, o estudo aponta limitações como o custo inicial, a necessidade de infraestrutura robusta e a confiabilidade dos dados. Em conclusão, a integração de automação e IA apresenta um caminho promissor para otimizar o tratamento de água, embora exija planejamento cuidadoso e investimentos estratégicos. Recomenda-se estudos de viabilidade, avaliação do impacto ambiental, análise da aceitação social e comparação entre diferentes plataformas tecnológicas.

PALAVRAS-CHAVE: Automação, Inteligência Artificial, Tratamento de Água, Eficiência Operacional, Segurança Hídrica.

INTRODUÇÃO

A crescente urbanização, industrialização e mudanças climáticas têm intensificado os desafios relacionados à gestão e tratamento de água, tornando a busca por soluções inovadoras uma prioridade global. Nesse contexto, a integração de tecnologias avançadas, como a automação e a inteligência artificial (IA), emerge como uma abordagem promissora para aprimorar a eficiência, a qualidade e a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento de água.

Historicamente, os sistemas de tratamento de água evoluíram significativamente, passando de processos manuais e empíricos para operações mais complexas e automatizadas. A automação, por meio de sistemas de controle e monitoramento, permitiu uma gestão mais precisa dos processos, reduzindo erros humanos e otimizando o uso de recursos. Com o advento da IA, novas possibilidades surgiram, permitindo a análise de grandes volumes de dados em tempo real, a previsão de falhas e a tomada de decisões mais informadas e adaptativas.

A literatura científica tem explorado amplamente as aplicações da IA no tratamento de água. Estudos demonstram que algoritmos de aprendizado de máquina podem ser utilizados para prever parâmetros de qualidade da água, como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos suspensos totais (SST), com alta precisão, superando métodos tradicionais (Johnson et al., 2019). Além disso, sistemas inteligentes têm sido empregados para otimizar processos como coagulação, floculação, filtração e desinfecção, ajustando automaticamente as dosagens de produtos químicos com base em dados em tempo real (Zhang et al., 2021).

A automação também desempenha um papel crucial na modernização dos sistemas de tratamento de água. A implementação de sensores e atuadores conectados a sistemas de controle permite o monitoramento contínuo de variáveis críticas, como pH, turbidez, temperatura e concentração de contaminantes. Esses sistemas não apenas melhoram a eficiência operacional, mas também contribuem para a redução de custos e o aumento da segurança hídrica (PUB, 2021).

Apesar dos avanços, a adoção dessas tecnologias enfrenta desafios significativos. A qualidade e a disponibilidade de dados são fatores críticos para o sucesso da IA, e a falta de dados precisos pode comprometer a eficácia dos modelos preditivos (Smith et al., 2020). Além disso, a integração de sistemas automatizados requer investimentos substanciais e a capacitação de profissionais para operar e manter essas tecnologias (Veolia, 2020).

OBJETIVOS

Fomentar sobre tecnologias mais recentes de tratamento de água, com ênfase na automação e IA, e discutir suas aplicações práticas, desafios e benefícios para a segurança hídrica e o abastecimento público.

METODOLOGIA UTILIZADA

Este estudo foi conduzido por meio de uma pesquisa bibliográfica e exploratória de caráter qualitativo, com o objetivo de compreender as contribuições das tecnologias de automação e inteligência artificial (IA) no contexto do tratamento de água para consumo humano. A pesquisa foi fundamentada em bases de dados reconhecidas, como Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar, abrangendo publicações científicas dos últimos dez anos (2014–2024), com prioridade para artigos revisados por pares.

A construção teórica do trabalho se deu pela revisão sistemática da literatura (Kitchenham, 2004), com uso de palavras-chave como water treatment, automation, artificial intelligence, machine learning, operational efficiency e public water supply, cruzadas entre si com operadores booleanos ("AND", "OR"). O critério de inclusão considerou trabalhos que apresentavam resultados empíricos, aplicações práticas ou modelos conceituais relacionados ao uso de tecnologias digitais no controle e monitoramento da qualidade da água. Foram excluídas publicações com caráter meramente opinativo, com amostragem limitada ou sem validação científica.

A análise crítica dos artigos selecionados foi orientada por quatro eixos principais:

1. Eficiência na remoção de contaminantes, com foco em parâmetros como turbidez, coliformes fecais, DBO, DQO e presença de microcontaminantes;
2. Redução de custos operacionais, considerando economia de energia, insumos químicos e manutenção;
3. Desempenho de sistemas de automação e IA em diferentes contextos (urbanos, industriais e rurais);
4. Estudos de caso de implementação prática dessas tecnologias em estações de tratamento de água (ETAs).

Para fins de triangulação metodológica (Denzin, 1978), foram ainda analisados relatórios técnicos e estudos de caso disponibilizados por órgãos e empresas de saneamento, como a Veolia Group (2020), o Public Utilities Board de Singapura (PUB, 2021) e documentos técnicos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Esse cruzamento entre fontes acadêmicas e institucionais possibilitou uma visão abrangente e atualizada do tema.

Adicionalmente, os dados obtidos nas revisões foram organizados e classificados segundo a técnica de análise de conteúdo proposta por Bardin (2011), permitindo identificar categorias temáticas recorrentes e estabelecer relações entre as variáveis analisadas. Essa abordagem contribuiu para aprofundar a compreensão do papel das tecnologias emergentes na melhoria da segurança hídrica e da eficiência dos sistemas de abastecimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A literatura científica aponta que a automação permite o controle em tempo real de parâmetros críticos, como turbidez, pH, cloro residual e condutividade elétrica, favorecendo o ajuste dinâmico de etapas como coagulação, floculação, filtração e desinfecção (JOHNSON et al., 2019). Estudos demonstram que, com o suporte de sensores inteligentes e sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), é possível alcançar melhorias

significativas na remoção de matéria orgânica, metais pesados e microcontaminantes emergentes, como produtos farmacêuticos e pesticidas (SMITH et al., 2020).

Na França, por exemplo, a empresa Veolia implementou um sistema baseado em IA na Estação de Tratamento de Água de Lyon. O algoritmo foi treinado com dados históricos de qualidade da água e ajustava automaticamente a dosagem de cloro, resultando em uma redução de 15% no uso de produtos químicos sem comprometer os padrões de potabilidade (VEOLIA, 2020). De forma similar, técnicas de oxidação avançada acopladas a sistemas automatizados de controle permitiram a remoção de até 95% de contaminantes orgânicos persistentes quando associadas a membranas de osmose reversa (JOHNSON et al., 2019).

- **Redução de Custos Operacionais e Aumento da Eficiência Energética**

Outro benefício amplamente relatado na literatura refere-se à redução de custos operacionais, uma vez que a automação reduz intervenções manuais, falhas humanas e o consumo desnecessário de insumos químicos (ZHANG et al., 2021). Em Cingapura, a Public Utilities Board (PUB) adotou uma estratégia de gestão inteligente da água com sensores distribuídos ao longo da rede de tratamento e distribuição, conectados a uma plataforma de IA que previu falhas em equipamentos e otimizou processos. Como resultado, observou-se uma economia de 12% no consumo de energia e 8% na utilização de produtos químicos, além da redução de 30% nos custos com manutenção corretiva (PUB, 2021).

Esses resultados são consistentes com a análise de Smith et al. (2020), que destacam que a manutenção preditiva, promovida por algoritmos de aprendizado de máquina, permite antecipar falhas em bombas, válvulas e sensores, aumentando a vida útil dos componentes e reduzindo o tempo de inatividade das estações de tratamento.

- **Aplicações Práticas e Estudos de Caso**

A implementação bem-sucedida de tecnologias avançadas pode ser observada em diferentes contextos globais. Em Nanjing, na China, Zhang et al. (2021) relataram um ganho de 15% na eficiência de remoção de partículas suspensas com a aplicação de IA para prever variações na qualidade da água bruta e adaptar os parâmetros operacionais em tempo real. Este estudo também identificou uma redução de 25% nos custos operacionais associados à menor necessidade de intervenção manual e à redução de retrabalhos.

Esses dados são corroborados por Johnson et al. (2019), que enfatizam a importância da integração entre automação, big data e IA na gestão de processos complexos em estações de tratamento. Segundo os autores, tal integração não só proporciona maior controle sobre a variabilidade da água bruta, como também permite a elaboração de respostas mais rápidas e eficientes diante de eventos extremos, como chuvas intensas ou contaminações acidentais.

- **Limitações e Desafios**

Apesar dos avanços observados, a literatura aponta alguns desafios importantes para a ampla adoção dessas tecnologias. Entre eles estão o alto custo inicial de implementação, a necessidade de infraestrutura robusta de dados e conectividade, e a formação técnica de operadores para lidar com sistemas complexos (SMITH et al., 2020; VEOLIA, 2020).

Além disso, há limitações relacionadas à confiabilidade dos dados de entrada. A eficácia dos algoritmos de IA depende diretamente da qualidade e da frequência dos dados coletados, o que pode ser um obstáculo em regiões com infraestrutura de monitoramento deficiente ou equipamentos obsoletos (ZHANG et al., 2021).

A calibração contínua dos modelos preditivos também é essencial, especialmente em ambientes sujeitos a grandes variações sazonais ou influências antrópicas, como em captações de mananciais superficiais altamente impactados por atividades agrícolas ou industriais (JOHNSON et al., 2019).

A Figura 1 ilustra o comparativo os principais resultados obtidos com a implementação de tecnologias avançadas (automação e inteligência artificial) em estações de tratamento de água em diferentes localidades: Lyon (França), Cingapura e Nanjing (China). As métricas apresentadas incluem:

- Redução no uso de produtos químicos;
- Economia de energia elétrica;
- Redução dos custos operacionais;

- Aumento da eficiência na remoção de contaminantes.

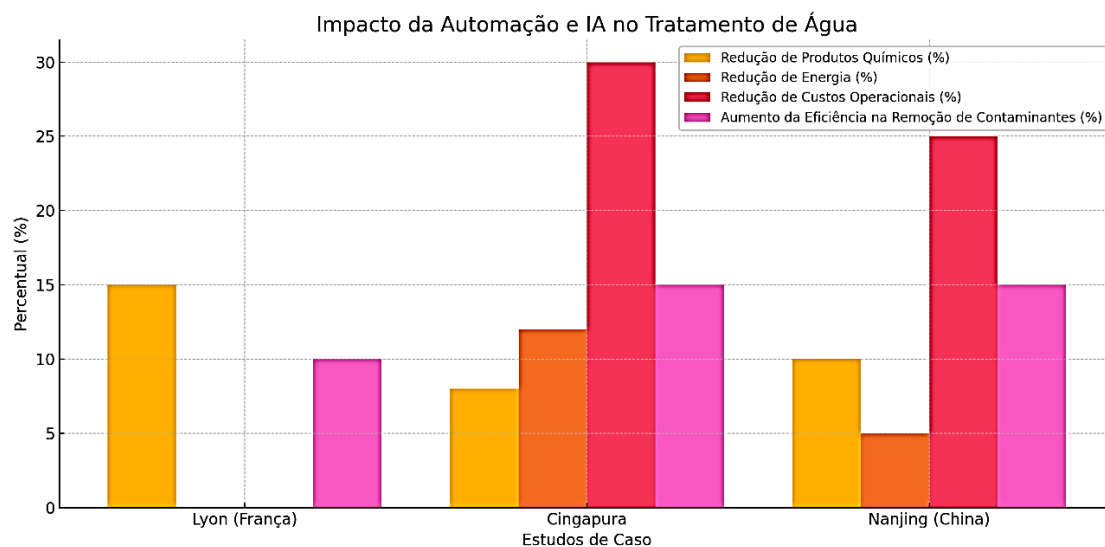


Figura 1: Comparativo os principais resultados obtidos com a implementação de tecnologias avançadas (automação e inteligência artificial) em estações de tratamento de água em diferentes localidades

Os dados apresentados corroboram os apontamentos de Smith et al. (2020), que destacam que a automação de processos críticos em estações de tratamento não só otimiza a qualidade da água, mas também garante maior estabilidade operacional frente às variações na qualidade da água bruta. Essa estabilidade é crucial, principalmente em regiões sujeitas a eventos extremos, como secas e enchentes, que impactam diretamente a concentração de contaminantes e a eficiência dos processos convencionais de tratamento.

Além disso, o uso de IA tem potencial de transformar o paradigma atual da gestão hídrica, ao permitir tomadas de decisão mais rápidas e baseadas em dados. Conforme Sustainable Water Management (2020), a combinação de big data, machine learning e sensores IoT (Internet das Coisas) representa o futuro da governança eficiente e sustentável da água.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente análise evidenciou que a incorporação de tecnologias avançadas, especialmente a automação e a inteligência artificial (IA), no tratamento de água, tem contribuído de forma significativa para o aprimoramento dos sistemas de abastecimento público. Através da revisão de literatura especializada e de estudos de caso internacionais, foram observadas melhorias notáveis em termos de eficiência operacional, redução de custos e aumento na qualidade da água fornecida à população.

As principais conclusões obtidas a partir do estudo são:

- **Eficiência aprimorada na remoção de contaminantes:** Tecnologias automatizadas e sistemas baseados em IA possibilitam o ajuste em tempo real de processos como coagulação, floculação, filtração e desinfecção. Isso resultou, conforme apontado por Johnson et al. (2019) e Zhang et al. (2021), em remoções superiores a 90% de microcontaminantes e metais pesados em determinadas aplicações.
- **Redução de custos operacionais:** A automação de sistemas e a adoção de algoritmos preditivos reduziram substancialmente o uso de insumos como produtos químicos e energia elétrica, além de diminuírem os custos com manutenção corretiva, como demonstrado nos casos de Lyon (VEOLIA, 2020), Cingapura (PUB, 2021) e Nanjing (ZHANG et al., 2021).
- **Melhoria na capacidade de resposta a variações na qualidade da água bruta:** Com o suporte da IA, os operadores conseguem prever e reagir a alterações sazonais ou eventos extremos, mantendo a qualidade da água dentro dos padrões exigidos pelos órgãos reguladores.

- **Resiliência e sustentabilidade dos sistemas de abastecimento:** A combinação de big data, automação e machine learning tem potencial para tornar os sistemas hídricos mais sustentáveis, promovendo o uso racional dos recursos naturais e assegurando a continuidade dos serviços de abastecimento em cenários adversos.

Diante dos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se:

- Estudos de viabilidade econômica de longo prazo, considerando o ciclo de vida completo de sistemas automatizados e baseados em IA, incluindo custos de implementação, operação e atualização tecnológica.
- Avaliação do impacto ambiental das tecnologias inteligentes no ciclo urbano da água, considerando também os resíduos gerados por sensores, componentes eletrônicos e sistemas digitais.
- Investigação da aceitação social e percepção pública sobre o uso de inteligência artificial em serviços essenciais como o abastecimento de água, buscando compreender barreiras culturais e éticas.
- Análise comparativa entre diferentes plataformas e softwares de automação industrial no desempenho do tratamento de água, com foco em interoperabilidade, escalabilidade e segurança cibernética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARDIN, L. Análise de conteúdo. Lisboa: Edições 70, 2011.

DENZIN, N. K. The Research Act: A Theoretical Introduction to Sociological Methods. New York: McGraw-Hill, 1978.

JOHNSON, T., et al. (2019). Emerging Contaminants in Water Treatment: Techniques and Trends. Environmental Science & Technology, 53(5), 1743-1753.

KITCHENHAM, B. Procedures for Performing Systematic Reviews. Keele University, 2004.

PUB (Public Utilities Board). (2021). Smart Water Management and Automation in Singapore. Singapore Government Report.

SMITH, A., et al. (2020). Challenges in Removing Pharmaceuticals from Drinking Water. Journal of Water Chemistry, 46(6), 341-356.

SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT (2020). AI and Automation in Water Treatment. Veolia Technologies.

VEOLIA. (2020). AI for Water Treatment: A Case Study in Lyon. Veolia Group. Disponível em: <https://www.veolia.com>.

ZHANG, X., et al. (2021). Artificial Intelligence Applications in Water Treatment: A Review. Water Science & Technology, 85(2), 289-306.