MODELAGEM EMPÍRICA DA DOSAGEM DE COAGULANTE COM BASE EM DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Giovani Quieli[(1)]
Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Viçosa e Técnico em Meio Ambiente pelo SENAI, está como Analista de Processos Jr na empresa Veracel Celulose, onde desenvolve projetos de melhoria de processos na área de utilidades, incluindo tratamento de água bruta e tratamento de água para caldeiras.

Endereço[(1)]**:** Rua dos Hibiscos, 201, ap. 13 – Village I – Porto Seguro - BA - CEP: 45.810-000 - Brasil - Tel: +55 (32) 99990-4522 - e-mail: giovani.quieli@veracel.com.br.

RESUMO

O controle da dosagem de coagulante no tratamento de água bruta é um ponto crítico para garantir a eficiência do processo, a estabilidade operacional e a redução de custos em fábricas de celulose. Este projeto teve como objetivo desenvolver um modelo matemático, baseado em dados operacionais reais de qualidade da água, para estimar a dosagem ideal. Com base na análise de dados históricos, foi desenvolvida uma equação empírica simples do tipo f(x), em que f representa a dosagem recomendada e x a turbidez da água bruta. A curva foi validada em teste operacional e permitiu o estabelecimento de uma lógica clara e replicável para ajuste da dosagem em diferentes condições de operação.
A aplicação do modelo resultou em uma redução de 8% no consumo de coagulante durante o período de teste, pois diminuiu os períodos de superdosagem do produto, o que também contribuiu para a redução do uso de alcalinizante na correção de pH. O projeto constitui uma base estratégica para a automação preditiva do processo. Este trabalho reforça a importância da análise de dados como base para a tomada de decisão operacional e mostra como simples soluções analíticas podem gerar ganhos tangíveis e escaláveis em plantas industriais.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de água, otimização de processo, inteligência operacional

INTRODUÇÃO

A dosagem adequada de coagulante é uma etapa crítica no tratamento de água, pois impacta diretamente a remoção de turbidez, a formação de flocos e o desempenho global da clarificação (VON SPERLING, 2014). Na prática operacional de muitas ETAs (Estações de Tratamento de Água), esse ajuste é frequentemente realizado de forma manual, com base na experiência do operador, o que pode levar à superdosagem ou subdosagem, aumentando o custo com insumos químicos e comprometendo a estabilidade do processo (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2014).

Neste contexto, o presente trabalho propõe a construção e aplicação de uma equação empírica de dosagem de coagulante baseada em dados de qualidade da água, como turbidez e pH. A abordagem busca otimizar o uso de produtos químicos e padronizar a operação, reduzindo a variabilidade entre turnos e minimizando a dependência de ajustes manuais.

A aplicação dessa modelagem promove ganhos operacionais e ambientais, como a redução do consumo de químicos, aumento da previsibilidade do processo, melhor controle da clarificação e preparação da ETA para automação futura (OLIVEIRA & GHISI, 2020). Além disso, contribui para uma operação mais eficiente e sustentável, alinhada às diretrizes de inovação e transformação digital no setor de saneamento (ANA, 2021).

OBJETIVOS

Objetivo Geral

- Otimizar a dosagem de coagulante em uma ETA, através de uma modelagem empírica, utilizando dados operacionais de qualidade da água como base para tomada de decisão automatizada e eficiente.

Objetivos Específicos

- Coletar e organizar dados operacionais de qualidade da água bruta e tratada (como turbidez e pH), correlacionados à dosagem de coagulante utilizada historicamente.
- Construir uma equação empírica de dosagem por meio de análise estatística, visando representar o comportamento ótimo da dosagem em função das variáveis monitoradas.
- Aplicar e validar a equação no processo operacional real, comparando os resultados obtidos com a prática atual em termos de eficiência, consumo químico e estabilidade do processo.
- Avaliar o impacto da modelagem na redução de custos operacionais, melhoria do controle de processo, padronização da operação e potencial de automação da dosagem.
- Propor diretrizes de implementação da modelagem como ferramenta prática e de baixo custo para ganho de eficiência e sustentabilidade em ETAs.

METODOLOGIA UTILIZADA

Coleta e Tratamento de Dados Operacionais

Foram extraídos dados a cada uma hora, durante um ano, do Sistema de Gerenciamento da Informação da Estação de Tratamento de Água, incluindo:

- Qualidade da água bruta (WFR): turbidez e pH após a dosagem de alcalinizante;
- Vazão de água bruta;
- Vazão de coagulante;
- Qualidade da água tratada (WFC): turbidez dos filtros pares, turbidez dos filtros ímpares e pH.

Os dados foram organizados em planilhas do Microsoft Excel e filtrados para que atingissem as premissas:

- Vazão de água bruta: > 500 m³/h;
- pH após a dosagem de coagulante: 6,75 a 6,85;
- Turbidez dos filtros pares e ímpares: < 0,95 NTU;
- pH da água tratada: 6 a 8.

Desenvolvimento da Equação Empírica

A partir dos dados de vazão de água bruta e vazão de coagulante coletados e o valor da densidade do coagulante, obtida na ficha técnica do produto, calculou-se a dosagem aplicada em ppm, conforme equação (1).

$$\textbf{Dosagem de coagulante (ppm)} = Q_{coagulante} * \rho_{coagulante}\ 1000/Q_{WFR}\ (m^3/h) \qquad \text{equação (1)}$$

Em que:
$Q_{coagulante}$: vazão de coagulante (L/h);
$P_{coagulante}$: densidade do coagulante (g/cm³);
Q_{WFR}: vazão de água bruta (m³/h)

Os dados da turbidez de água bruta (NTU) foram colocados em uma coluna x, e a dosagem de coagulante (ppm) em uma coluna y e um gráfico x,y foi plotado. Verificou-se, pelo r^2 da equação obtida, qual tipo de correlação se ajustava melhor aos dados.

Em seguida, foi feito o processo de remoção de *outliers*. Foram removidos valores extremos, de um a um, até maximizar o r^2 da equação.

Aplicação no Processo e Validação

A equação foi aplicada de forma experimental em uma operação real da ETA, com acompanhamento dos seguintes indicadores:

- Eficiência da clarificação (turbidez da água tratada);
- Consumo de químicos;
- Estabilidade operacional (desvio padrão da dosagem aplicada e da turbidez final).

Os resultados foram comparados com o período anterior à aplicação da modelagem para medir os ganhos práticos.

Avaliação de Impacto e Melhoria de Processo

Com o uso do *software* Minitab Statistical, foi realizada uma análise dos impactos obtidos com a aplicação da equação, com índice de confiabilidade de 95%, através de cartas de controle e recomendações técnicas foram elaboradas para serem padronizadas de forma a melhorar o processo.

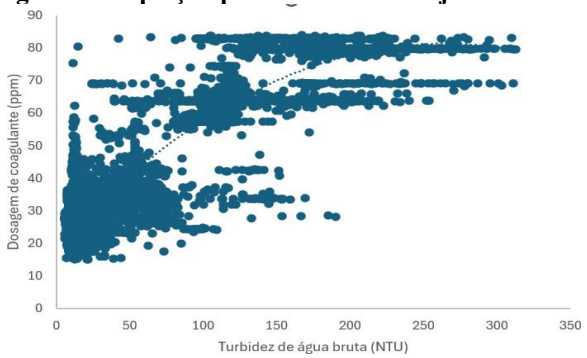
RESULTADOS E DISCUSSÕES

A equação (2) foi construída, utilizando 8636 conjuntos de dados x, y, e o melhor modelo obtido foi o polinomial, após tratamento dos dados, com um r^2 igual a 0,7943 (Figura 1).

$$\mathbf{y = -0{,}001x^2 + 0{,}4983x + 18{,}884} \qquad \text{equação (2)}$$

Em que:
y: dosagem de coagulante prevista (ppm);
x: turbidez da água bruta (NTU).

Figura 1 – Equação polinomial obtida ajustada aos dados



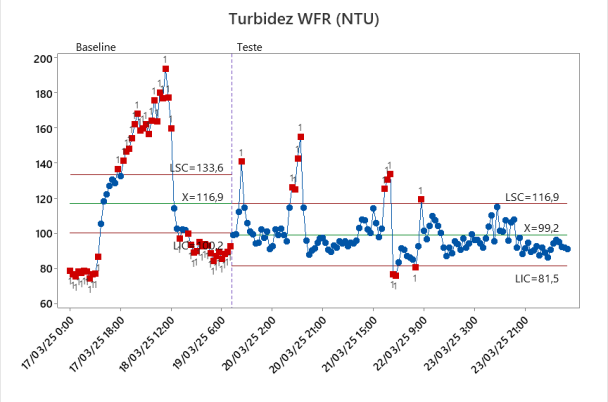
Fonte: elaboração própria (2025)

Para a realidade imprevisível e dinâmica da indústria de celulose, um modelo com coeficiente de determinação de 0,7943 é considerado promissor para uma aplicação industrial. Para se obter um r^2 maior, é necessário incluir no modelo outras variáveis que influenciam a dosagem do químico, além da turbidez e pH da água, como por exemplo: composição química da água bruta, zonas mortas e agitação no sistema. Entretanto, a dificuldade em implementar medidores *online* dessas variáveis é uma limitação para esta melhoria.

Espera-se, ao analisar a Figura 1, que a equação é aplicável para condições de turbidez de água bruta entre 5,5 e 313 NTU e com uma dosagem estimada de coagulante de 15 e 84 ppm.

Decidiu-se implementar a equação no processo industrial por 5 dias e comparar com um período de *baseline* de 2 dias. Esses períodos foram definidos para que a turbidez do rio não variasse tanto durante o teste, e assim, os resultados serem reflexos maiores do modelo matemático introduzido. A Figura 2 mostra que o período de *baseline* teve uma turbidez média de 116, 9 NTU, enquanto o período de teste apresentou turbidez de 99,2 NTU.

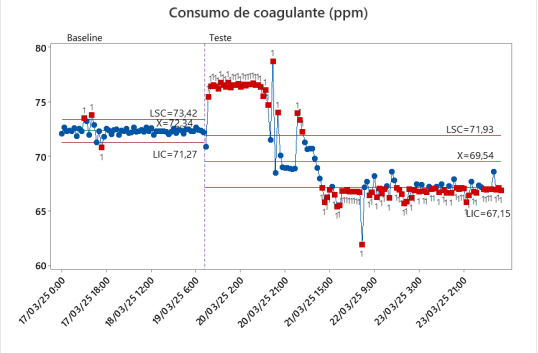
Figura 2 - Carta de controle de turbidez de água bruta dos períodos de *baseline* e de teste



Fonte: elaboração própria (2025)

A Figura 3 demonstra como se comportou o consumo de coagulante durante a aplicação industrial do modelo empírico.

Figura 3 - Carta de controle de consumo de coagulante nos períodos de *baseline* e teste



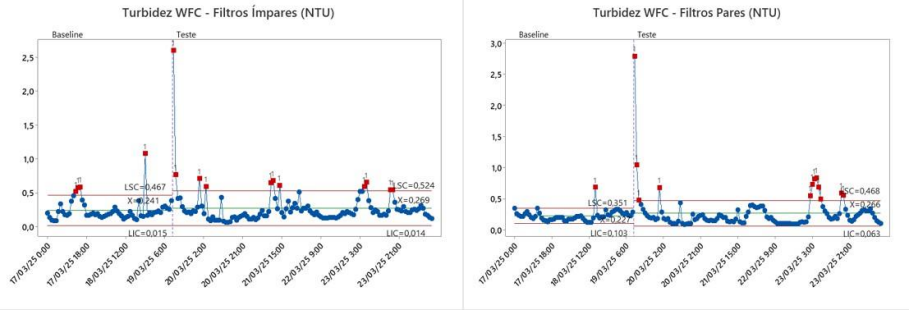
Fonte: elaboração própria (2025)

Observa-se, pela Figura 3, que o consumo de coagulante ficou praticamente constante durante o *baseline*, com uma média de 72,34 ppm. Isso demonstra que não estava tendo nenhum tipo de ajuste de forma a otimizar a dosagem do químico na rotina operacional.

Ao iniciar o teste, houve um aumento na dosagem do produto, indicando que, pela equação (2), o químico estava sendo subdosado. Porém, logo em seguida, houve uma redução significativa do consumo, permanecendo nessa condição até o fim do teste (média de 69,54 ppm).

A Figura 4 evidencia que os ajustes efetuados durante o teste não afetaram a qualidade da água tratada, uma vez que a turbidez se manteve constante, tanto nos filtros pares quanto nos ímpares.

Figura 4 - Cartas de controle de turbidez de água tratada durante os períodos de *baseline* e teste nos filtros ímpares e pares



Fonte: elaboração própria (2025)

Esse resultado demonstra uma redução média em 2,80 ppm no consumo de coagulante. Além deste benefício, essa diminuição também contribui para um menor consumo de NaOH (hidróxido de sódio) na correção do pH. O coagulante utilizado é o PAC (policloreto de alumínio) 18% que atua de forma eficiente a um pH de 6,8 e tende a acidificar a água. O hidróxido de sódio é adicionado no pré-tratamento para ajustar o pH em 6,8; com a menor adição de coagulante, menos ajuste de pH será necessário.
A estequiometria entre NaOH e PAC é de 6:1. Convertendo essa relação molar para mássica, a redução de 2,80 ppm de policloreto de alumínio proporcionaria uma redução de 154,4 toneladas de soda cáustica 50% por ano.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação da modelagem empírica para dosagem de coagulante demonstrou ser uma ferramenta eficiente, de baixo custo e alto impacto operacional na Estação de Tratamento de Água. A equação desenvolvida com base em dados reais permitiu ajustar a dosagem de forma mais precisa, reduzindo a ocorrência de superdosagem e, consequentemente, diminuindo o consumo de produto químico em 8% sem comprometer a eficiência do processo. Apesar dessa redução, o principal retorno financeiro esperado é em relação a otimização do consumo de soda cáustica 50% que pode chegar a 154,4 toneladas por ano.

Além da economia gerada, recomenda-se padronizar o uso dessa modelagem na rotina da operação: o engenheiro de processos ficando responsável por atualizar o modelo mensalmente, com os novos dados gerados e os operadores ficarão a cargo de consultar o resultado da equação, no mínimo, uma vez ao turno de forma a reduzir o consumo, além de checar a qualidade da água e comunicar e tomar ações corretivas, caso necessário. Esse recurso matemático torna o processo mais eficiente, ao ficar menos dependente de ajustes mais morosos, como *jar tests* que são tradicionalmente utilizados para determinar a melhor dosagem de coagulante.

Como há uma margem de erro inerente da equação desenvolvida, recomenda-se que, caso a dosagem prevista apresente uma diferença maior que 10 ppm de em relação a dosagem real, seja feito um teste de jarro para confirmar os resultados.

Portanto, conclui-se que a abordagem proposta é tecnicamente viável, economicamente vantajosa e estrategicamente alinhada à transformação digital das operações industriais e ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. *Panorama do Saneamento Básico no Brasil – 2021.* Brasília: ANA, 2021.

2. OLIVEIRA, R.F.; GHISI, E. *Automação no tratamento de água: benefícios e desafios para o setor de saneamento.* Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.25, n. 4, 2020.

3. TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5ª ed. Nova Yorque: McGraw-Hill, 2014.

4. VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.