# IMPACTOS DO *FOULING* ORGÂNICO EM RESINAS ANIÔNICAS: CAUSAS, DIAGNÓSTICO E ESTRATÉGIA DE RECUPERAÇÃO POR SALMOURAGEM ALCALINA - ESTUDO DE CASO

**Rebeca Beck** [(1)]
Engenheira Química formada em 2018 pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), com atuação nas áreas de engenharia de processos e produção em indústrias de celulose e papel, utilidades e tratamento de água e efluentes. Possui experiência no acompanhamento e na otimização de sistemas de água para fins industriais. Atualmente atua como Engenheira Plena de Processos na Cetrel DAC, com foco em gestão de riscos operacionais e melhoria contínua de sistemas químicos.

**Endereço[(1)]:** Rua Eteno, 1561 – Polo Industrial de Camaçari - Camaçari - Bahia - CEP: 42816-200 - Brasil - Tel: +55 (71) 98725-5675 - e-mail: rebecabeck@cetrel.com.br

## RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo de caso da aplicação de salmouragem alcalina para a recuperação de resinas aniônicas contaminadas por matéria orgânica na Cetrel unidade DAC - Distribuição de Água Camaçari. Como a principal fornecedora de águas para consumo humano e industrial e unidade de tratamento de efluentes para o Polo Industrial de Camaçari, a confiabilidade operacional da Cetrel é estratégica para garantir o abastecimento contínuo e seguro das indústrias da região. As unidades de desmineralização por troca iônica desempenham um papel crítico nesse cenário, produzindo água desmineralizada de alta pureza. Contudo, a presença de matéria orgânica nos vasos aniônicos gera o fenômeno de *fouling*, onde macromoléculas, como ácidos húmicos e fúlvicos, fixam-se aos sítios ativos das resinas aniônicas fortes. As consequências desse problema incluem o bloqueio cinético da troca iônica, queda acentuada no volume de campanha dos vasos e aumento no consumo de regenerantes. O trabalho aborda as causas e o diagnóstico desse cenário, demonstrando como a técnica de salmouragem alcalina atuou de forma eficiente na remoção dos contaminantes orgânicos, restaurando a capacidade de troca da resina e otimizando a performance do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Troca Iônica, Salmouragem, *Fouling* Orgânico**.**

## INTRODUÇÃO

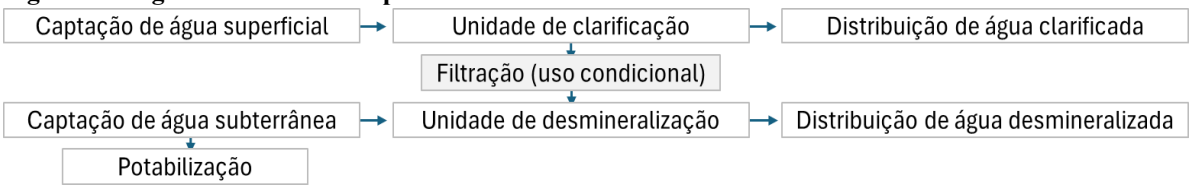
A Unidade de Tratamento de Água (UTA) da Cetrel, situada no Polo Petroquímico de Camaçari, é estratégica para o abastecimento industrial da região, fornecendo água clarificada, potável e desmineralizada, esta última essencial para os processos de geração de vapor em caldeiras de alta pressão. A matriz hídrica da unidade é composta por águas superficiais e subterrâneas. Devido à sua elevada qualidade, a água subterrânea é direcionada preferencialmente para as plantas de desmineralização (Unidades I e II) sem a necessidade de pré-tratamentos na clarificação.

O processo de desmineralização opera em cinco etapas consecutivas: descloração, decatiônização, descarbonatação, deaniônização e polimento em leito misto. A bateria de vasos descloradores operam para, num cenário de necessidade de alinhamento de água filtrada, mitigar a degradação hidrolítica da matriz polimérica das resinas catiônicas. Adicionalmente, as resinas aniônicas também estão suscetíveis a ataques e envenenamentos químicos, tanto por subprodutos da degradação das resinas catiônicas pelo cloro quanto pela presença de matéria orgânica na água de alimentação. Esse fenômeno de *fouling* orgânico obstrui os sítios ativos aniônicos, comprometendo a cinética de troca e a campanha dos vasos.

Na sequência do fluxo, a água desclorada passa pelos vasos catiônicos, onde os cátions são retidos e os sais são convertidos nos seus respectivos ácidos, utilizando ácido sulfúrico para a regeneração. A água decationizada segue para as torres de descarbonatação, que removem o $CO_2$ gasoso por arraste de ar em contracorrente através de recheios de anéis Raschig. Posteriormente, a água descarbonatada alimenta os vasos aniônicos para a retenção dos ânions remanescentes, cuja regeneração química emprega hidróxido de sódio. Por fim, o polimento em leito misto assegura a deionização total contra fugas iônicas antes do armazenamento nos tanques e distribuição para

diversas empresas do polo petroquímico de Camaçari-BA. Os efluentes gerados nos ciclos de regeneração são encaminhados a um sistema dedicado de neutralização para adequação do pH aos padrões de descarte ambiental.

**Figura 1- diagrama de blocos simplificado da unidade**




Fonte: Elaboração própria

## OBJETIVO

Avaliar a eficiência do procedimento de salmouragem alcalina como estratégia de recuperação química para resinas aniônicas fortemente básicas que sofreram processo de *fouling* orgânico na planta de desmineralização I da Unidade de Tratamento de Água (UTA) da Cetrel DAC, localizada no Polo Petroquímico de Camaçari-BA.

## METODOLOGIA

O presente estudo de caso seguiu um delineamento experimental e operacional estruturado em três etapas principais:

- **Dados de Processo e Diagnóstico Técnico.**

A primeira etapa consistiu no levantamento dos dados históricos de operação das plantas de desmineralização I e na intensificação do monitoramento analítico da água subterrânea de alimentação. Paralelamente, foram mapeados os indicadores de desempenho dos vasos aniônicos, especificamente o volume de água desmineralizada produzida por ciclo de campanha, qualidade da saída de água, o volume de água consumido na etapa de enxágue final e característica do efluente da regeneração.

Para a determinação da causa-raiz do distúrbio operacional, aplicou-se uma metodologia de análise de falhas baseada no histórico de intervenções da planta, correlacionando os eventos de processo com a cronologia de perda de performance dos vasos. A perda de capacidade de troca iônica dos vasos e a característica avermelhada do efluente confirmou o diagnóstico de *fouling* orgânico na unidade de desmineralização I.

- **Planejamento Operacional e Ações de Intervenção (Duas Fases).**

Com o problema diagnosticado, a engenharia de operação atuou em duas frentes cronológicas:

Fase I - Mitigação Emergencial: Foi realizado um trabalho de adequação nas variáveis do ciclo de regeneração convencional com soda cáustica, ajustando tempos de contato, concentrações e vazões de aplicação. Essa manobra permitiu conter temporariamente a perda de especificação da água de saída e estabilizar o fornecimento de água para o Polo, garantindo o tempo necessário para o condicionamento e liberação operacional do sistema para a parada definitiva.

Fase II - Recuperação por salmouragem alcalina: Com o sistema devidamente condicionado, aplicou-se o protocolo de choque químico através da injeção de uma solução aquosa combinada de cloreto de sódio (NaCl a 10%) e hidróxido de sódio (NaOH a 2%), concentração padrão indicada pelo fabricante. A solução foi aplicada, seguida de um período de contato estático e enxágue para desinventariar os contaminantes eluídos.

- **Avaliação de Desempenho e Padronização.**

Após a intervenção, os novos perfis de sílica, tempo de enxágue e cor do efluente foram monitorados para determinar recuperação da capacidade de troca iônica das resinas. Por fim, validou-se a eficiência do processo para a consolidação do procedimento de salmouragem alcalina nos demais vasos da bateria.

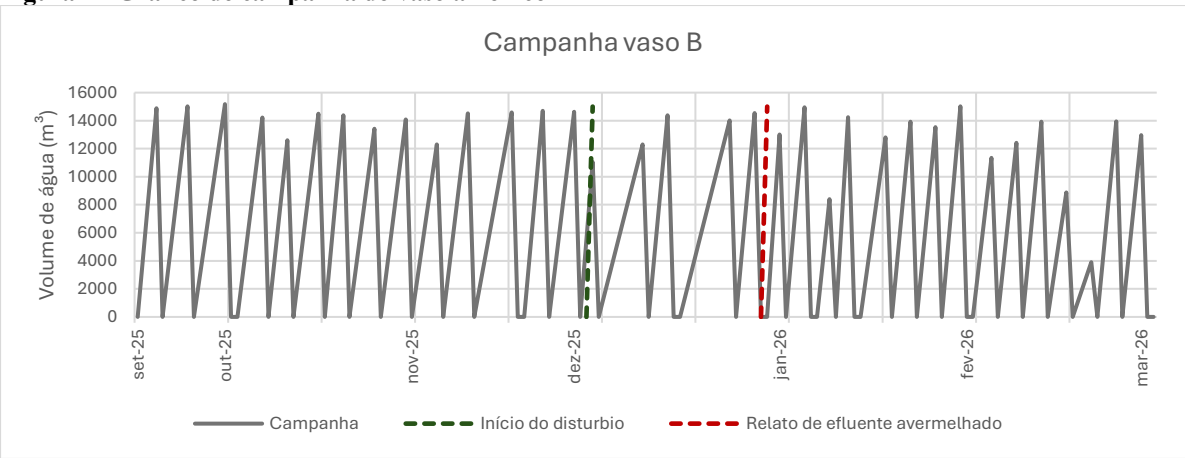
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

- **Coleta de Dados de Processo e Diagnóstico Técnico**

O processo de investigação do distúrbio operacional nas plantas de desmineralização I iniciou-se a partir do rastreamento dos principais indicadores-chave de desempenho das colunas de troca iônica. Diante de um cenário de perda de eficiência na produção de água de alta pureza, fez-se necessário correlacionar o comportamento hidrodinâmico e químico dos leitos com o histórico recente de intervenções na planta. Para tanto, a dinâmica investigativa combinou o monitoramento de variáveis de campo e a aplicação de ferramentas de análise de causa-raiz. Essa abordagem integrada permitiu isolar as variáveis de processo e compreender a cronologia dos fatos que culminaram no envenenamento das resinas aniônicas.

Como é possível observar na Figura 2 a seguir, com um recorte das campanhas do leito aniônico B entre os meses de setembro de 2025 e fevereiro de 2026, observou-se a transição de um cenário de campanhas constantes na faixa de 15.000 m³ por campanha para cenários de grande variação por não especificações, ou seja, retorno da regeneração sem enquadramento dos parâmetros de sílica e condutividade e alta variação de performance. A Figura representa o totalizador de água passado pelo vaso, sendo o indicador reiniciado a cada ciclo de regeneração. Em verde tracejado destaca-se o início da variação de campanha e em vermelho tracejado destaca-se a primeira ocorrência relatada de efluente da regeneração na cor avermelhada.

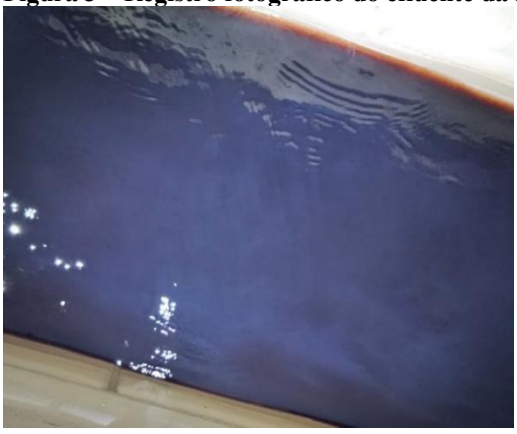
**Figura 2 - Gráfico de campanha do vaso aniônico B**




Fonte: Elaboração própria a partir de dados históricos reais

Conforme destacado em vermelho na cronologia do gráfico, o ápice do distúrbio coincidiu com a eluição de um efluente de coloração avermelhada escura. Esse fenômeno visual, registrado na Figura 3 a seguir, constitui uma evidência de campo do processo de dessorção e eluição da carga massiva de matéria orgânica refratária acumulada no leito aniônico B, bloqueando os seus sítios ativos.

**Figura 3 – Registro fotográfico do efluente da regeneração do vaso B com cor avermelhada**



Fonte: Registro próprio

Além da alteração de campanha e do efluente de regeneração, foi observado a necessidade de maior tempo de enxágue dos vasos para que atingisse patamares de qualidade para serem alinhados ao processo, a Tabela 1 a seguir mostra o tempo médio por mês das etapas de enxágue no período analisado, antes e depois do agravamento do processo de contaminação no efluente. Foi considerado início do agravamento da contaminação em novembro de 2025, embora o efluente tenha se apresentado avermelhado em dezembro deste mesmo ano. A partir de meados de janeiro de 2026 foram iniciadas mitigações para o processo, como está detalhado nas ações de intervenção a seguir, que já apresentaram impactos positivos no tempo de enxágue.

**Tabela 1 - Tempo médio de enxágue em minutos do vaso B**

| **Período** | **Antes do agravamento da contaminação** | | **Depois do agravamento da contaminação do** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mês** | Set/25 | Out/25 | Nov/25 | Dez/25 | Jan/26 | Fev/26 |
| **Tempo enxágue** | 5 min | 7 min | 75 min | 99 min | 83 min | 51 min |

Fonte: Elaboração própria a partir de dados históricos reais

A manifestação de tempos de enxágue prolongados durante as regenerações com NaOH correlaciona-se com a natureza viscoelástica das moléculas orgânicas retidas na matriz. Conforme demonstrado por Wang *et al.* (2022), esses contaminantes possuem propriedades que, sob a ação de agentes alcalinos, reduzem a integridade da camada de *fouling*, aprisionando os eletrólitos regenerantes e exigindo maiores volumes de água para a completa eluição e conformidade da condutividade de saída.

Segundo Frisch e Kunin (1960), embora o regenerante cáustico seja geralmente ineficaz na eluição desses contaminantes orgânicos, observou-se a capacidade de produzir efluentes altamente coloridos provenientes de trocadores aniônicos obstruídos. Esse fenômeno ocorre porque o caráter fortemente alcalino do hidróxido de sódio promove a ionização e a consequente solubilização parcial das macromoléculas orgânicas retidas na matriz da resina. Ao serem parcialmente dessorvidos e arrastados para o meio aquoso, esses compostos liberam uma coloração que varia do âmbar ao avermelhado escuro, servindo como um indicador visual do nível de contaminação do leito.

Ainda de acordo com Gönder *et al.* (2006), o *fouling* orgânico compromete diretamente a eficiência do sistema, resultando em água produzida com qualidade inferior e redução na quantidade de sítios ativos disponíveis na resina aniônica. Esse fenômeno encurta o tempo de campanha do leito e, consequentemente, eleva o consumo de produtos químicos de regeneração.

A convergência entre a perda de capacidade de troca iônica (Figura 2), a eluição de compostos cromóforos no efluente (Figura 3) e o aumento no tempo de enxágue (Tabela 1) consolidou o diagnóstico técnico de envenenamento por matéria orgânica no leito aniônico. Para fins de confirmação, realizou-se a amostragem da resina em um dos vasos da bateria que apresentava comportamento análogo ao do vaso B deste estudo. Como demonstrado na Figura 4, a inspeção visual ratificou o quadro de *fouling* devido à coloração escura e opaca das esferas poliméricas.

**Figura 4 – Coloração da resina coletada antes da salmouragem**



Fonte: Registro próprio

Essa tonalidade observada na amostra foi confrontada diretamente com a escala padrão de contaminação orgânica desenvolvida pelo fabricante Purolite (Figura 5), permitindo quantificar com maior precisão o real nível de degradação do leito. O guia visual do fornecedor estabelece o grau de *fouling* de acordo com a alteração cromática das esferas, variando de baixa a severa, e, por meio dessa correlação, constatou-se que o estado físico da resina se enquadra na categoria de contaminação severa.

**Figura 5 – Escala padrão Purolite para classificação de contaminação orgânica**




Fonte: Adaptado de Purolite ([s.d.])

Esse conjunto de evidências de campo confirmou o comprometimento temporário dos sítios ativos da resina pela carga orgânica retida, fundamentando a necessidade de planejamento e execução de uma intervenção química para a restauração completa da performance original do ativo.

- **Planejamento Operacional e Ações de Intervenção (Duas Fases)**

A Fase I do planejamento operacional consistiu na estabilização temporária do sistema de desmineralização por meio do ajuste das variáveis cinéticas da regeneração convencional com hidróxido de sódio (NaOH). Esta intervenção emergencial fez-se mandatória uma vez que o sistema físico de salmouragem da planta necessitava de manutenções e ajustes estruturais para viabilizar, de forma segura, a injeção da solução combinada de sal e soda. Assim, a otimização temporária da regeneração convencional foi a estratégia adotada para conter a perda das campanhas operacionais e garantir o fornecimento contínuo de água para o Polo Industrial.

Para fundamentar essa manobra, o foco foi no aumento do tempo de contato entre o regenerante alcalino e a matriz polimérica obstruída pela matéria orgânica. Modificou-se o tempo das etapas de aplicação e deslocamento de 1,5 h para 2,0 h, com aumento de 1h no total de tempo de contato, reduzindo simultaneamente a vazão de soda em, aproximadamente, 30% e a vazão da água de diluição e deslocamento em 10%. Embora a massa total de regenerante tenha sido mantida constante, a fim de não haver maiores prejuízos ao consumo específico de regenerante, tivemos a redução da concentração operacional de 2,5% para 2,0%.

Essa desaceleração controlada da taxa de aplicação hidráulica visou mitigar os efeitos difusionais limitantes impostos pelo *fouling*. Sob severa contaminação orgânica, os íons carregados negativamente das cadeias laterais alifáticas das substâncias orgânicas são trocados pelos ânions móveis associados aos grupos funcionais da resina, enquanto o restante de sua estrutura macromolecular volumosa acumula-se na superfície da esfera, inibindo a penetração de contra-íons na matriz polimérica e obstruindo os sítios de troca internos (WIERCIK; GARBOWSKI; CHROBOT, 2024). Portanto, uma passagem mais lenta da soda cáustica favorece a penetração do íon hidroxila ($OH^-$) nas camadas mais profundas da esfera da resina. É importante ressaltar que, por se tratar de uma limpeza puramente alcalina e convencional, essa intervenção não apresentou um efeito de restauração completa da capacidade de troca da resina. No entanto, os ganhos operacionais foram significativos, visto que a qualidade da água tratada foi enquadrada, permitindo manter o vaso em operação. Isso ocorreu devido à redução de desvios de especificação logo após as partidas, o que evitou a necessidade de regenerações duplas consecutivas, cenário que, anteriormente, limitava a produtividade da unidade e elevava o consumo de insumos.

A Tabela 2 apresenta o histórico dos parâmetros de qualidade da água de saída do vaso aniônico B de setembro de 2025 a fevereiro de 2026. Nos meses de novembro e dezembro de 2025, período identificado como o pico da contaminação, os valores médios de sílica foram aproximadamente duas vezes maiores do que os patamares alcançados após a implementação da Fase I. É importante ressaltar que, mesmo antes do agravamento da contaminação, os dados já demonstravam um comportamento irregular no leito de troca iônica, contudo, essa instabilidade ainda não comprometia a operacionalidade do vaso e tampouco manifestava os demais sintomas que fundamentaram o diagnóstico definitivo de *fouling* por matéria orgânica.

**Tabela 2 – Sílica na água de saída do vaso B**

| Período | Antes do agravamento da contaminação | | Depois do agravamento da contaminação | | Após implementada a Fase I | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mês** | Set/25 | Out/25 | Nov/25 | Dez/25 | Jan/26 | Fev/26 |
| **Sílica** | 54 ppb | 78 ppb | 70 ppb | 63 ppb | 42 ppb | 26 ppb |

Fonte: Elaboração própria a partir de dados históricos reais

A redução nos valores de sílica na saída do leito obtida durante a operação do vaso comprova a eficácia da cinética de regeneração lenta aplicada na Fase I. Contudo, esses patamares analíticos ainda não são suficientes para caracterizar o leito como totalmente descontaminado. Essa condição residual foi evidenciada pela persistência da coloração avermelhada no efluente de descarte, o que justifica a necessidade de progressão para a Fase II, com a aplicação do choque de salmoura alcalina no vaso.

O princípio fundamental da Fase II baseia-se na elevação da força iônica e no efeito osmótico induzidos no meio regenerante à temperatura ambiente. O íon cloreto ($Cl^-$), injetado a 10% de concentração, atua deslocando as moléculas de matéria orgânica ancoradas aos sítios ativos de amônio quaternário da resina aniônica. Segundo Haddad, Bazinet e Barbeau (2021), a atuação do NaCl ocorre através de uma reação reversível de troca iônica entre a resina e a solução, expressa por:

$$\mathbf{n[R^+]Cl^- + NOM^{n-} \leftrightarrow n[R^+]NOM^{n-} + Cl^-} \qquad \text{equação (1)}$$

Onde $R^+$ representa o grupo funcional da resina e $NOM^{n-}$ a matéria orgânica carregada negativamente. Enquanto a reação direta indica a retenção da matéria orgânica pela resina, a reação inversa demonstra o mecanismo exato de regeneração da resina exausta por meio do deslocamento promovido pelo cloreto. Simultaneamente, o hidróxido de sódio (NaOH) garante que a matéria orgânica permaneça desprotonada e ionizada, maximizando sua solubilidade em meio aquoso.

Para o desenvolvimento do procedimento de limpeza orgânica, tomou-se como base o volume do leito de resina dos vasos aniônicos da desmineralização I. O dimensionamento estabeleceu o consumo total de 3 volumes do leito (do inglês *Bed Volume* - BV) de uma solução composta por NaCl a 10% e NaOH a 2%, fracionada em três etapas de aplicação consecutivas. A concentração da solução de salmouragem foi definida com base procedimento padão do fabricante da resina, mantendo-se os valores fixos em função do histórico de eficiência dessas proporções. A aplicação consiste no deslocamento inicial, no qual o vaso aniônico é previamente drenado para receber o primeiro volume da solução preparada. A injeção é realizada a uma vazão equivalente a 2 BV/h durante aproximadamente 30 minutos. A drenagem do vaso é iniciada assim que o nível do fluido cobrir toda a resina. A aplicação 2 consiste no repouso e agitação por ar com aplicação nas mesmas condições da primeira etapa, de modo que haja a substituição integral da primeira solução.

Após a conclusão da entrada deste segundo bloco, a bomba de salmouragem é desligada e a válvula de respiro de ar do vaso é aberta e inicia-se o procedimento de agitação pneumática do leito via injeção de ar comprimido, mantendo-se a pressão interna do vaso controlada próxima a 1,0 bar por um período mínimo de 8 horas. Esse tempo prolongado de residência permite a máxima penetração nos microporos. Decorrido o tempo de contato, o vaso é drenado e inicia-se a aplicação 3 que consiste na eluição lenta, seguida de enxágue dinâmico em que resina é submetida a uma lavagem com água de processo no sentido normal de fluxo no vasão nominal de processo. O monitoramento é realizado via densidade e condutividade do efluente de saída, o término desta etapa ocorre quando a densidade da saída se equiparar à da entrada.

Concluído o enxágue, o vaso é submetido a uma etapa de contra lavagem em fluxo ascendente por um período de 40 minutos. A vazão de água deve ser ajustada para promover uma expansão hidráulica controlada do leito de resina de, no mínimo, 50% da sua altura compactada, promovendo a reclassificação das esferas e a eliminação de finos ou caminhos preferenciais. Como a resina aniônica de base forte foi intencionalmente convertida para a forma exausta de cloreto durante o choque de salmoura, torna-se necessária a execução de uma dupla regeneração sequencial para reconverter os sítios ativos para a forma operacional de hidroxila. O procedimento utiliza a mesma massa de soda convencionalmente aplicada, porém sob uma concentração química elevada de 10% M/M. Essa solução concentrada é aplicada em duas etapas independentes. Obrigatoriamente, realiza-se o procedimento completo de deslocamento entre a primeira e a segunda aplicação de soda, mantendo-se na etapa de deslocamento

os mesmos parâmetros de vazão e tempo praticados na fase de aplicação normal, assegurando a máxima eficiência de regeneração e o posterior enquadramento do vaso em campanha estável.

O sucesso do deslocamento da matéria orgânica pôde ser confirmado visualmente durante a execução do procedimento. Ao aplicar o choque químico, a eluição e a solubilização desses compostos orgânicos foram ratificadas pela alteração na característica do regenerante descartado. O efluente apresentou uma coloração escura, registrado na Figura 6, durante o processo de salmouragem e, na regeneração seguinte, demonstrado na Figura 7, voltou a apresentar aspecto límpido. Essa evidência visual comprova a eficácia da salmoura alcalina em extrair a carga orgânico aprisionada nos microporos.

**Figura 6 – Registro fotográfico do efluente da salmouragem do vaso B com cor avermelhada**



Fonte: Registro próprio

**Figura 7 – Registro fotográfico do efluente da primeira regeneração pós salmoura do vaso B**

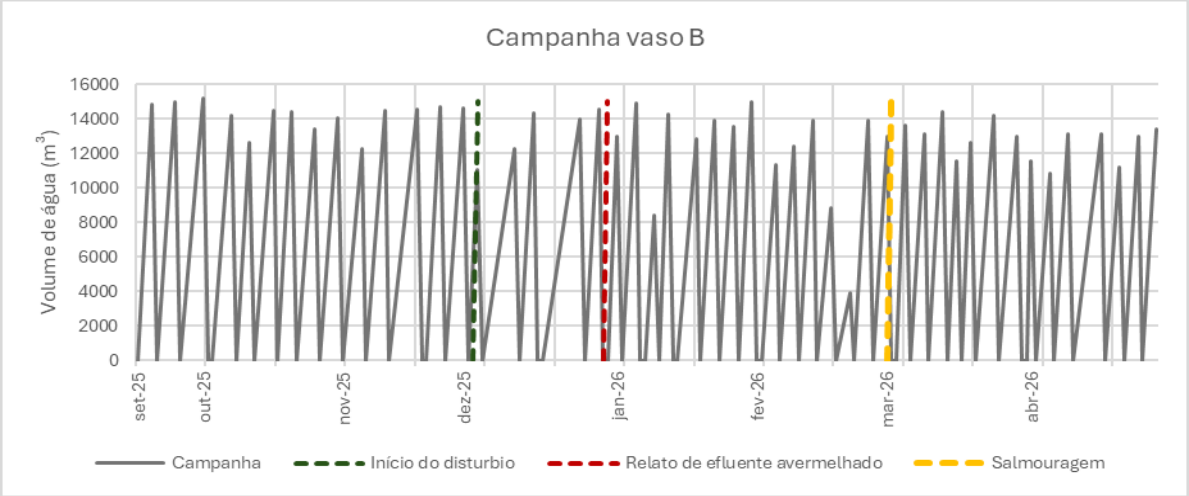


Fonte: Registro próprio

- **Avaliação de Desempenho e Padronização**

Após a conclusão da intervenção química por salmouragem alcalina na Fase II, foi iniciado o monitoramento do vaso aniônico para mensurar os ganhos de performance da unidade. O primeiro indicador avaliado foi a produtividade volumétrica dos ciclos de operação. Como apresentado no gráfico da Figura 8, o volume de água desmineralizada produzida por campanha, que vinha registrando oscilações devido ao bloqueio físico dos sítios ativos pelo *fouling* orgânico, apresentou uma recuperação no mês subsequente ao tratamento. A desobsorção da matéria orgânica restabeleceu a capacidade de troca iônica útil do leito, normalizando a extensão das campanhas em patamares condizentes com a capacidade do vaso. O gráfico apresenta um recorte do volume de água tratada entre as regenerações do vaso B no período de setembro de 2025 a abril de 2026. Além das marcações de início da variação e do surgimento de efluente com coloração, representados anteriormente em verde e azul, respectivamente, o gráfico mostra em amarelo tracejado o marco da data em que foi realizada a salmouragem na Fase II.

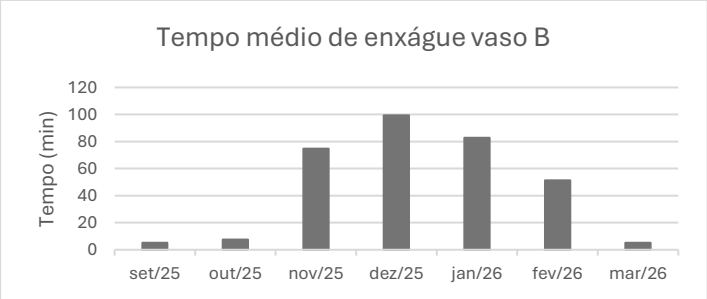
**Figura 8 - Gráfico de campanha do vaso aniônico B depois da salmoura**




Fonte: Elaboração própria a partir de dados históricos reais

Essa recuperação do volume útil de resina está atrelada à desobstrução dos microporos das esferas poliméricas, o que impactou a cinética de lavagem do sistema. Antes da salmouragem, a retenção de eletrólitos na matéria orgânica aprisionada estendia a etapa de enxágue. O gráfico da Figura 9 apresenta a evolução do tempo médio mensal de enxágue até o enquadramento da condutividade final da água de descarte ao longo do período do estudo, incluindo o mês posterior à intervenção. Observa-se que, com a matriz polimérica limpa, houve queda no tempo necessário para que o leito expulse o excesso de regenerante no mês de março, inclusive, nos meses de janeiro e fevereiro de 2026 como demostrado nos resultados da Fase I.

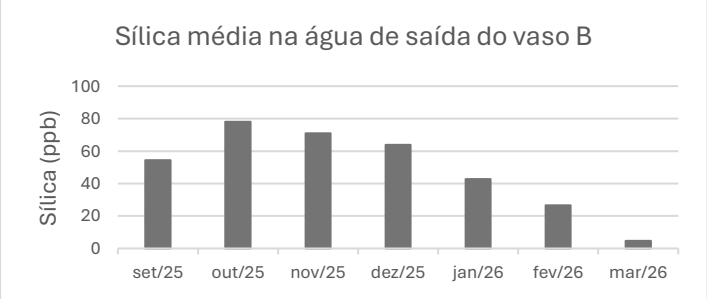
**Figura 9 - Gráfico do tempo médio de enxágue do vaso aniônico B**




Fonte: Elaboração própria a partir de dados históricos reais

Além de otimizar o tempo de enxágue e aumentar a campanha do leito, a salmouragem dos sítios de amônio quaternário recuperou o poder de troca da resina aniônica forte. O gráfico da Figura 10, também com o mesmo recorte de tempo de estudo, ilustra o comportamento da concentração de sílica mensurada durante dos ciclos. O perfil gráfico demonstra que padrão de qualidade da água produzida foi melhorado desde a Fase I, alcançando valores ótimos em março, mês seguinte à salmouragem.

**Figura 10 - Gráfico de sílica na saída do vaso aniônico B**




Fonte: Elaboração própria a partir de dados históricos reais

Em suma, os resultados obtidos após a intervenção técnica na Fase II comprovam a eficácia da salmouragem alcalina na restauração das propriedades cinéticas e absortivas do leito aniônico. A sinergia entre a recuperação do volume útil por campanha, a redução nos tempos de enxágue final e o controle de sílica ratifica o restabelecimento da seletividade e da capacidade de troca iônica do ativo. Diante do resultado observado no vaso B, o procedimento de salmoura alcalina foi estendido e aplicado de forma sequencial nos demais vasos da bateria que apresentavam o mesmo quadro diagnóstico. Como esperado, os demais leitos replicaram comportamentos semelhantes, consolidando a salmouragem alcalina como uma diretriz técnica eficaz para a mitigação do *fouling* orgânico.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo técnico diagnosticou e solucionou a perda de desempenho operacional na unidade de desmineralização de água. A investigação inicial evidenciou que a extensão nos tempos de enxágue final e as reduções de campanha por arraste de sílica estavam associadas à contaminação orgânica do leito aniônico, diagnóstico confirmado através do confronto visual com os padrões de alteração cromática do fabricante Purolite. A intervenção baseada no mecanismo de salmouragem alcalina com cloreto de sódio e hidróxido de sódio desfez as ligações que aprisionavam as macromoléculas orgânicas na resina, o que foi evidenciado pela coloração escura do regenerante descartado.

Os resultados operacionais subsequentes consolidaram a recuperação do sistema, com destaque para o restabelecimento do volume de água tratada por ciclo e o controle da sílica. É importante ressaltar que os impactos positivos começaram a se manifestar ainda na fase inicial do estudo, uma vez que nos meses de janeiro e fevereiro de 2026, após as primeiras ações de diagnóstico e ajustes preliminares da Fase I, já foi possível constatar uma redução significativa no tempo médio mensal de enxágue. A replicabilidade do procedimento nos demais vasos da bateria apresentou comportamento semelhante de recuperação e valida a solução adotada. Como recomendação final, aponta-se para a necessidade de padronização do procedimento de salmouragem preventiva.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FRISCH, NORMAN W.; KUNIN, ROBERT. *Organic Fouling of Anion-Exchange Resins. Journal of the American Water Works Association,* v. 52, n. 7, p. 875–887, jul. 1960.

2. GÖNDER, Z. BERIL; KAYA, YASEMIN; VERGILI, ILDA; BARLAS, HULUSI. *Capacity loss in an organically fouled anion exchanger. Desalination*, v. 189, n. 1-3, p. 303-307, 2006.

3. HADDAD, M.; BAZINET, L.; BARBEAU, B. *Towards Water, Sodium Chloride and Natural Organic Matter Recovery from Ion Exchange Spent Brine. Membranes*, v. 11, n. 4, p. 262, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/membranes11040262. Acesso em: 10/05/2026.

4. LEVCHUK, I.; RUEDA MÁRQUEZ, J. J.; SILLANPÄÄ, M. *Removal of natural organic matter (NOM) from water by ion exchange - A review. Chemosphere*, v. 192, p. 90-104, fev. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.101. Acesso em: 01/06/2026.

5. PUROLITE. Procedimento de salmouragem alcalina. [S. l.: s. n.], [s.d.]. Documento técnico interno fornecido pelo fabricante.

6. WANG, Q.; YANG, X.; QI, R.; ZHANG, L. *Reconstruction and Removal Mechanisms of Gel-like Membrane Fouling for Seawater Desalination: Experiments and Molecular Dynamics Simulations. Polymers*, v. 14, n. 18, p. 3734, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/polym14183734. Acesso em: 15/05/2026.

7. WIERCICK, P.; GARBOWSKI, T.; CHROBOT, P. *The Study of Humic Substances' Impact on Anion Exchangers. Materials*, v. 17, n. 6, p. 1237, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma17061237. Acesso em: 20/05/2026.