USO DE MÓDULO DE ULTRAFILTRAÇÃO COMPACTO EM PAUDALHO-PE COMO ESTRATÉGIA DE RESILIÊNCIA HÍDRICA: ESTUDO DE CASO DA COMPESA

Artur Ricardo Macedo dos Santos[1]
Engenheiro Civil (UFRN), atuação em cargos de gestão hídrica na Compesa, atualmente Coordenador de Micromedição. Especialista em Dessalinização e Reúso pela Universidade de Alicante. Coordenador Adjunto da CT de Dessalinização e Reúso da ABES, membro da ALADYR e AEDyR. Liderou projeto de dessalinização por SWRO em Fernando de Noronha (72 m³/h), eliminando racionamento. Capacitações pelo BID (Gestão Integrada de Dessalinização) e Banco Mundial (Monitoramento Climático e Resiliência).
Nyadja Menezes Rodrigues Ramos[2]
Engenheira Civil, Doutora em Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental e Mestre em Gestão Pública para o Desenvolvimento do Nordeste. Possui MBA em Estratégia Empresarial, pós-graduações em Gestão Ambiental e Planejamento de Cidades, e formação em Liderança. Docente da UNIFAVIP/Wyden. Assessora Executiva COMPESA. Gestora da Obra lote 5B da Adutora do Agreste.
Hudson Tiago Dos Santos Pedrosa[3]
Engenheiro civil pela UFAL, mestre e doutorando em Recursos Hídricos pela UFPE. Atua como analista de saneamento na Compesa, onde já foi coordenador do CCO, gerente de Planejamento Operacional e gerente de Segurança de Barragens. Atualmente, é gerente da Unidade de Negócios da Mata Norte. Também atuou como gerente de Abastecimento de Água Rural na Secretaria de Recursos Hídricos e de Saneamento de Pernambuco, acumulando ampla experiência em gestão hídrica, saneamento e liderança estratégica no setor.
Valderice Pereira Alves Baydum[4]
Química Industrial (UFPE) e Engenharia Ambiental (Unicap), mestrado e doutorado em Engenharia Química pela UFPE, além de duas especializações e pós-doutorado pelo RENORBIO (2021), com foco em remediação eletroquímica de rejeitos de dessalinizadores. Atuou como Analista de Processos Químicos em multinacionais de 2001 a 2008. Trabalhou por 10 anos professora assistente na UNICAP. Especialista Tratamento de Água na COMPESA. Possui expertise em tratamento de águas, efluentes e processos oxidativos avançados.
Jadiel Mendonça De Vasconcelos[5]
Engenheiro Eletricista (UFPE), MBA em Gestão e Engenharia de Sistemas Elétricos (IPOG) e especialista em Comercialização de Energia Elétrica (UNINASSAU). Analista de Saneamento na COMPESA, atua em projetos de geração distribuída, gestão de usinas, créditos e faturas de energia. Possui experiência como perito judicial e desenvolve soluções inovadoras em energia solar flutuante e otimização de sistemas elétricos, com participação ativa em eventos técnicos do setor.

Endereço[1]**:** Rua Amália de Sousa Bernadino, 5532, Apto 3101 Acqua – Boa Viagem - Recife - Pernambuco - CEP: 59021-150 - Brasil - Tel: +55 (81) 99541-3300 - e-mail: artursantos@compesa.com.

RESUMO

A Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) implementou, no município de Paudalho-PE, uma Estação de Tratamento de Água (ETA) compacta com membranas de ultrafiltração como parte de uma estratégia para ampliar a oferta de água potável e aumentar a resiliência hídrica regional frente à seca. Este artigo técnico-acadêmico descreve o caso de estudo, abordando os aspectos de gestão hídrica, eficiência energética e operacional, e os impactos na mitigação das mudanças climáticas. A nova ETA de Paudalho, instalada em 2024, adicionou 50 L/s à capacidade do Sistema Integrado Paudalho, beneficiando cerca de 150 mil pessoas. A solução adota tecnologias modernas para remover turbidez e micro-organismos patogênicos, garantindo padrões rigorosos de potabilidade. O estudo apresenta a implementação do sistema, sua adequação às normas técnicas e os resultados de desempenho. A ultrafiltração compacta mostrou-se eficaz como medida de adaptação climática, aumentando a segurança hídrica e contribuindo para a sustentabilidade no Estado de Pernambuco.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de Ultrafiltração Compacto, Resiliência Hídrica, Eficiência Energética.

INTRODUÇÃO

O Estado de Pernambuco enfrenta desafios significativos de gestão hídrica devido ao desequilíbrio entre oferta e demanda de água e aos efeitos das mudanças climáticas. A região Nordeste do Brasil, incluindo Pernambuco, sofre com eventos recorrentes de seca severa, alternados com chuvas intensas que afetam a qualidade dos mananciais. Como resultado, Pernambuco possui "um dos piores balanços hídricos do país", segundo declaração do Governo Estadual. Em resposta, estratégias de resiliência hídrica e aumento da segurança no abastecimento tornaram-se prioritárias nas políticas públicas. Tecnologias inovadoras de tratamento de água, como os sistemas de membranas de ultrafiltração, vêm sendo adotadas para enfrentar esses desafios, devido à sua eficiência na remoção de contaminantes e capacidade de operar sob grande variação de qualidade da água bruta.

Este artigo apresenta um estudo de caso da implementação de módulo compacto de ultrafiltração no município de Paudalho, Zona da Mata Norte de Pernambuco, como parte das iniciativas da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) para melhoria do abastecimento regional. A nova Estação de Tratamento de Água (ETA) de Paudalho foi concebida para ampliar em 25% a oferta de água para os municípios atendidos pelo Sistema Integrado Paudalho (que inclui Paudalho, Carpina, Tracunhaém e Chã de Alegria), reduzindo drasticamente o regime de rodízio (intermitência) no fornecimento de água. Com investimento de aproximadamente R$ 11 milhões, a ETA entrou em operação em 2024, beneficiando diretamente cerca de 150 mil habitantes.

A relevância deste caso de estudo reside não apenas no ganho imediato de capacidade e confiabilidade do sistema de abastecimento, mas também em como ele exemplifica a integração de diversos eixos temáticos estratégicos: gestão e monitoramento hídrico, avaliação de iniciativas de mitigação e adaptação climática, aplicação de metodologias de eficiência (como Six Sigma), eficiência energética, e adoção de tecnologia de membranas de ponta na operação de tratamento de água. A seguir, são detalhados os objetivos do projeto, a metodologia empregada em sua concepção e implantação, os resultados obtidos em termos de desempenho técnico-operacional e os impactos na resiliência hídrica regional, seguidos de uma discussão à luz dos temas de mudança do clima e gestão estratégica. Por fim, apresentam-se as conclusões e recomendações para replicabilidade do projeto em contextos semelhantes.



Figura 1 – Vista geral do módulo compacto de ultrafiltração instalado na ETA de Paudalho-PE.

OBJETIVOS

O projeto da ETA compacta de ultrafiltração em Paudalho teve objetivos técnicos e estratégicos bem definidos. Do ponto de vista técnico-operacional, o objetivo principal foi aumentar a oferta de água tratada em 50 L/s (180 m³/h) no Sistema Integrado Paudalho, eliminando ou reduzindo déficits de abastecimento e assegurando a qualidade da água entregue à população dentro dos padrões do Ministério da Saúde (Portaria GM/MS nº 888/2021). Esse incremento de vazão corresponde a cerca de 25% de aumento na capacidade do sistema, visando compensar o crescimento da demanda e as perdas de produção associadas à seca e à degradação de mananciais.

Paralelamente, houve objetivos estratégicos alinhados à resiliência climática e eficiência:

- Resiliência hídrica: Tornar o abastecimento menos vulnerável às variações extremas da qualidade e quantidade de água bruta, garantindo operação contínua mesmo durante períodos de turbidez extrema por chuvas (quando sistemas convencionais podem interromper a operação) ou de estiagem prolongada.

- Qualidade da água: Alcançar níveis superiores de tratamento, com barreira efetiva contra patógenos (meta de ≥4 log de remoção de protozoários como Giardia e ≥ 5 log para Cryptosporidium) e sólidos, mantendo turbidez média do produto final <0,1 NTU e cor ≤ 5 UH, excedendo requisitos regulatórios para água potável.

- Eficiência energética e operacional: Implantar uma unidade compacta e automatizada, com motores de alto rendimento e controle por inversores de frequência, seguindo as normas internas da COMPESA, para reduzir o consumo específico de energia (kWh/m³) e facilitar a operação e manutenção. Os equipamentos eletromecânicos foram especificados conforme normas técnicas como a NTC-010-12: Motor Elétrico de Baixa Tensão (que exige motores certificados pelo INMETRO, atendendo à eficiência classe premium segundo NBR 17094) e a NTC-026: Quadro de Comando de Baixa Tensão Abrigado (partida direta, soft-starter ou inversor), garantindo padronização e segurança.

- Sustentabilidade e mitigação climática: Reduzir a necessidade de medidas emergenciais de alto carbono, como transporte de água por carros-pipa ou bombeamentos de longa distância movidos a diesel durante secas extremas. A iniciativa foi concebida como parte das ações de mitigação das mudanças climáticas, ao melhorar a eficiência do sistema e diminuir emissões indiretas de CO_2, e inclui planos de monitoramento e avaliação (M&A) desses benefícios climáticos ao longo do tempo.

- Desenvolvimento institucional e inovação: Servir como projeto piloto para difusão da tecnologia de membranas na companhia, desenvolvendo competências locais em operação de sistemas de ultrafiltração e promovendo a inovação tecnológica. Inclui-se aqui a capacitação de equipes técnicas (operadores e mantenedores) e a aplicação de princípios Six Sigma (Green Belt) para melhoria contínua, otimizando parâmetros operacionais (p.ex., ciclos de filtração e retrolavagem) via metodologia DMAIC (Definir-Mensurar-Analisar-Melhorar-Controlar) e comunicando claramente os resultados e lições aprendidas dentro da organização.

METODOLOGIA UTILIZADA

A abordagem metodológica para a concepção e implementação do sistema de ultrafiltração compacto em Paudalho combinou análises de engenharia, protocolos normativos e ferramentas de gestão de projetos e qualidade. As principais etapas metodológicas foram:

1. Diagnóstico e definição do problema (DMAIC - Definir/Mensurar): Inicialmente, realizou-se um diagnóstico abrangente do Sistema Integrado Paudalho, identificando gargalos de produção de água tratada e riscos operacionais. Foram mensurados indicadores como a vazão disponível vs. demanda, frequência do rodízio de abastecimento e a qualidade da água bruta do manancial. Ensaios e laudos de qualidade da água ao

longo de dois anos (períodos de chuva e estiagem) foram analisados para definir os parâmetros de projeto do novo sistema. Verificou-se, por exemplo, que a turbidez da água bruta poderia atingir picos de até centenas de NTU em eventos de chuva intensa, e que algas/cianobactérias e metais como ferro e manganês também estavam presentes em níveis preocupantes nos piores cenários (ver Tabela 1 adiante). Esses dados evidenciaram a necessidade de uma tecnologia de tratamento mais robusta e flexível do que a convencional, definindo-se assim o escopo: implantação de unidades modulares de ultrafiltração integradas à ETA existente.

2. Análise de alternativas (DMAIC - Analisar): Considerando o diagnóstico, foram estudadas alternativas de solução. Avaliou-se a ampliação da ETA convencional existente (por meio de mais filtros de areia e decantadores) versus a implantação de um sistema compacto de membranas. Os critérios incluíram eficácia de tratamento para alta turbidez e patógenos, tempo de implantação, custo-benefício, área disponível e consumo energético. A ultrafiltração mostrou vantagens significativas em assegurar qualidade constante independentemente da turbidez da água bruta e atender aos padrões de potabilidade mais rigorosos. Além disso, por se tratar de unidades pré-fabricadas em contêiner, a implementação seria mais rápida e com menor área ocupada. Estudos de caso de tecnologias semelhantes em outras localidades (e.g., projeto piloto em Pedra-PE, também da COMPESA, que utilizou membranas de ultrafiltração) foram consultados para prever o desempenho e possíveis desafios operacionais. Optou-se pela ultrafiltração com pré-tratamento simplificado, conforme detalhado a seguir, e foram então dimensionados os componentes do sistema.

3. Dimensionamento e especificação técnica: Com base nos parâmetros da água bruta e vazão alvo de 50 L/s, dimensionou-se o sistema de tratamento composto por: (**a**) uma etapa de pré-tratamento para condicionamento da água bruta (removendo a fração grossa de turbidez, metais e algas) e (**b**) módulos de ultrafiltração propriamente ditos, operando em fluxo constante. O termo de referência elaborado pela COMPESA (Anexo VI) definiu critérios de dimensionamento e desempenho. Por exemplo, para se atingir 95% de eficiência de produção nos módulos de ultrafiltração, a turbidez da água de alimentação dos módulos deve ser reduzida para no máximo 50 NTU quando a água bruta atingir valores extremos de até 700 NTU. De forma similar, estipulou-se que concentrações elevadas de alumínio, ferro, manganês e cianobactérias presentes na fonte fossem atenuadas por pré-tratamento (coagulação/floculação seguida de decantação ou filtração rápida) até níveis seguros de entrada (ver Tabela 1), garantindo a proteção das membranas e a qualidade final. Cada módulo de ultrafiltração (contêiner) contém múltiplos cartuchos de membrana e é equipado com sistemas auxiliares dedicados: *bombas de alimentação, bomba de retrolavagem (backwash), bomba de limpeza química (CIP) e soprador de ar* para varredura das membranas, além de instrumentos de monitoramento online (pressão, turbidez, SDI etc.). Previu-se redundância em equipamentos críticos – por exemplo, uma bomba de reserva a cada grupo de bombas de alimentação e de retrolavagem – para aumentar a confiabilidade operacional. Todas as especificações obedeceram às normas técnicas internas aplicáveis da COMPESA já mencionadas (NTC-010, NTC-026, NTC-137), bem como normas brasileiras (NBR) pertinentes e normas internacionais de referência para membranas.

4. Implementação e controle (DMAIC - Melhorar/Controlar): A execução do projeto seguiu práticas de gerenciamento segundo o **PMBOK**, com cronograma físico-financeiro e marcos definidos. A montagem eletromecânica dos módulos compactos foi realizada em fábrica e transportada para o local (ETA Paudalho) para integração ao sistema existente, minimizando o tempo de parada. O escopo de fornecimento incluiu, além do módulo e de seus skids de bombas, todos os serviços de *startup*, comissionamento, operação assistida por 6 meses e treinamento de operadores locais. Durante o comissionamento, foram feitos ajustes finos nos parâmetros de operação (fluxo de filtragem, frequência de retrolavagens, dosagens químicas) com base no monitoramento em tempo real da performance das membranas. Utilizaram-se indicadores-chave para acompanhamento, como: turbidez da água produzida, índice de integridade das membranas (testes de integridade para detecção de fibras rompidas), consumo específico de reagentes (coagulantes, agentes de limpeza CIP) e consumo de energia por m³ produzido. Esses dados alimentaram um sistema de **monitoramento e avaliação (M&A)** contínuo, permitindo avaliar a eficácia da intervenção tanto em termos de melhoria do abastecimento quanto de impactos ambientais. A metodologia DMAIC do **Six Sigma** foi empregada nesse estágio para controlar o desempenho: por exemplo, se os dados mostrassem aumento de pressão transmembrana (TMP) ou queda de permeabilidade ao longo do tempo acima do esperado, acionava-se análise de causa-raiz e ações corretivas (como otimização do ciclo CIP ou intensificação do pré-tratamento) para retornar às condições ótimas.

5. Conformidade e documentação: Atendendo às exigências de projetos públicos e assegurou-se a conformidade com normas de segurança e qualidade. Por exemplo, as estruturas metálicas da ETA compacta

(tanques, suportes, contêineres) receberam pintura de proteção anticorrosiva de acordo com a norma Petrobras N-1550, garantindo durabilidade frente à exposição ambiental. Todo o projeto elétrico até a automação seguiu referências normativas detalhadas, para integração da ETA ao Centro de Controle Operacional da COMPESA via telemetria, permitindo acompanhamento remoto dos indicadores operacionais e climáticos (nível do manancial, qualidade da água bruta, etc.).



Figura 2 – Detalhe do arranjo das tubulações e módulo do sistema de ultrafiltração compacta.

RESULTADOS OBTIDOS

A implantação do módulo de ultrafiltração compactos em Paudalho gerou resultados positivos imediatos tanto em capacidade de produção de água quanto em qualidade e confiabilidade do sistema, comprovando a eficácia da solução. A seguir são apresentados os principais resultados, acompanhados de dados técnicos coletados:

a) Aumento de vazão e cobertura de abastecimento:

Conforme planejado, a Estação de Tratamento de Água (ETA) compacta de **ultrafiltração (UF)** agregou **50 L/s** de vazão ao Sistema Integrado Paudalho, ampliando a oferta total de água para os quatro municípios atendidos em aproximadamente **25%**. Em termos populacionais, **aproximadamente 150 mil habitantes** passaram a ser atendidos regular e continuamente com a água proveniente desse incremento.

Na prática, o ganho se refletiu na **redução do rodízio**: bairros que antes recebiam água apenas alguns dias por semana passaram a ter abastecimento diário ou com intervalos muito menores. Relatos operacionais indicam que a nova unidade elevou o **índice de continuidade do serviço** (horas de fornecimento por dia) em dezenas de pontos críticos da rede, inclusive durante o período de estiagem 2024-2025, cenário em que historicamente se verificava colapso parcial do abastecimento.

A UF consome **volume significativamente menor para retrolavagem** quando comparada a filtros rápidos descendentes convencionais. Esse menor descarte se traduz em **maior disponibilidade líquida** para a população sem demandar captação adicional de mananciais. Outro fator estratégico para Paudalho é o caráter **integrado do sistema (SI)**: a ampliação da oferta beneficia não apenas o município-sede, mas também diversas localidades vizinhas interligadas, melhorando a resiliência hídrica de toda a microrregião.

b) Qualidade da água tratada:

O módulo de UF forneceu água de excelente qualidade, acima dos padrões de potabilidade exigidos. A turbidez média permaneceu **≤ 0,1 NTU**, com valores instantâneos sempre **< 0,3 NTU**, mesmo quando a turbidez da água bruta ultrapassou 100 NTU em eventos de chuva intensa. A contagem de partículas > 2 µm no efluente filtrado manteve-se geralmente **< 20 partículas m/L** em 95 % do tempo, atendendo à meta de projeto.

De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, art. 36, § 12, sistemas de abastecimento que utilizam filtração por membranas devem assegurar turbidez ≤ 0,1 NTU em pelo menos 99 % das medições mensais. A série histórica de dados operacionais demonstra conformidade plena com esse critério. A Portaria 888/21 introduziu limites mais restritivos para diversos parâmetros microbiológicos e físico-químicos e já sinaliza futuras ampliações, como possíveis níveis-guias para micropoluentes emergentes e microplásticos.

- A barreira física da UF, com poros nominais de 0,01–0,04 µm, retém cianobactérias, vírus e partículas coloidais, oferecendo redução logaritma superior à exigida para protozoários (≥ 4 LRV) e vírus (≥ 2 LRV).

- Essa capacidade posiciona a tecnologia como solução de prontidão regulatória, pois atende ou supera exigências que unidades convencionais de coagulação-floculação-filtração rápida dificilmente alcançariam sem upgrades significativos.

- Em relação a microplásticos, estudos recentes indicam eficácias de remoção superiores a 99 % para partículas de 1–10 µm em sistemas de UF, criando uma barreira de segurança adicional à saúde pública.

Ensaios microbiológicos confirmaram a ausência de coliformes totais e *Escherichia coli* em 100 mL de amostra de água tratada, indicando barreira completa a esses indicadores de contaminação fecal. Em relação a protozoários, embora os valores de Giárdia e *Cryptosporidium* na água bruta fossem variáveis, a ETA garantiu, por validação do processo, **log-removal** ≥ 4 para Giárdia e ≥ 5 para *Cryptosporidium*, atendendo com folga à Portaria MS 888/2021 no quesito turbidez e segurança microbiológica. A **Tabela 1** resume os parâmetros de qualidade monitorados, comparando a condição da água bruta em cenários críticos, a qualidade após o pré-tratamento e a qualidade final após ultrafiltração.

Como se observa, o sistema de ultrafiltração atendeu aos objetivos de qualidade com ampla margem de segurança. Destaca-se que o pré-tratamento conseguiu reduzir parâmetros críticos da água bruta a níveis adequados para as membranas (por exemplo, turbidez de 700 para 50 NTU, ferro de 14 para 0,15 mg/L, cianobactérias de 700 mil para < 10 mil cél/mL), permitindo que a ultrafiltração operasse eficientemente (95% de disponibilidade) sem ocorrência de colmatação excessiva. A qualidade da água final permaneceu estável e independente das oscilações bruscas da qualidade de entrada, comprovando a **robustez** da barreira de membranas.

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade da água: valores de projeto e desempenho obtido em Paudalho-PE

PARÂMETRO	ÁGUA BRUTA (PIOR CASO)[1]	APÓS PRÉ-TRATAMENTO (PROJETO)[2]	ÁGUA TRATADA (UF) – DESEMPENHO
Turbidez (NTU)	até 700	≤ 50	< 0,1 (média); máx 0,25
Cor verdadeira (uH)	até 150	≤ 15 (estimado)	≤ 5
Ferro (mg/L)	até 14	≤ 0,15	≤ 0,1
Manganês (mg/L)	até 3,0	≤ 0,015	≤ 0,015
Alumínio (mg/L)	até 0,5[3]	≤ 0,2	≤ 0,2
Cianobactérias (cel/mL)	até 700.000	< 10.000	< 100[4]
Coliformes totais (NMP/100mL)	10^5 (evento extremo)	—	Ausente
Giardia (cistos/10L)	n/d[5]	—	≥4 log remoção (calc.)
Cryptosporidium (ooc/10L)	n/d[5]	—	≥5 log remoção (calc.)

Notas: 1. Valores aproximados de referência, com base em laudos de água bruta e literatura local. 2. Meta de qualidade da água após etapas de coagulação/filtração prévias às membranas, segundo critérios de projeto. 3. Alumínio refere-se principalmente ao residual de coagulante; valor de pico estimado. 4. Água tratada isenta de células viáveis; valor indica contagem em eventual pós-tratamento (ex.: filtração de segurança). 5. *n/d*: não disponível – patógenos protozoários não quantificados diretamente; remoção inferida pelo nível de integridade do processo.

c) Desempenho operacional e eficiência energética:

Nos primeiros meses de operação assistida, o sistema alcançou uma eficiência de produção de cerca de 95%, com paradas apenas para as limpezas programadas (retrolavagens a cada 30 minutos e limpezas químicas CIP aproximadamente 1 vez por mês, conforme a necessidade). O consumo específico de energia elétrica medido foi da ordem de 0,8 a 1,2 kWh por metro cúbico de água produzido, variando conforme a pressão de operação (TMP) e a utilização das bombas de retrolavagem e sopradores. Esse consumo mostrou-se compatível com outras instalações de ultrafiltração de porte similar e foi otimizado pelo uso de motores de alto rendimento (atendendo à NBR 17094, classe de eficiência premium) e inversores de frequência nas principais bombas. As normas técnicas internas da COMPESA, como a NTC-137, contribuíram para essa eficiência ao especificar, por exemplo, motobombas com materiais adequados (rotores em polipropileno, selos mecânicos de alto desempenho) e motores IP55 trifásicos de classe de isolação F, aptos a operação com inversores.

Em termos de eficiência operacional, a automação implantada (sistema supervisório/CLP) permitiu controle preciso e reação rápida a desvios: caso a turbidez de saída excedesse um limiar ou fosse detectado rompimento em alguma fibra de membrana, alarmes eram gerados e ações corretivas (isolamento do módulo, iniciação de retrolavagem ou CIP) eram tomadas imediatamente. Essa automação reduziu a necessidade de intervenção manual constante, liberando a equipe operacional para tarefas de otimização e manutenção preventiva.

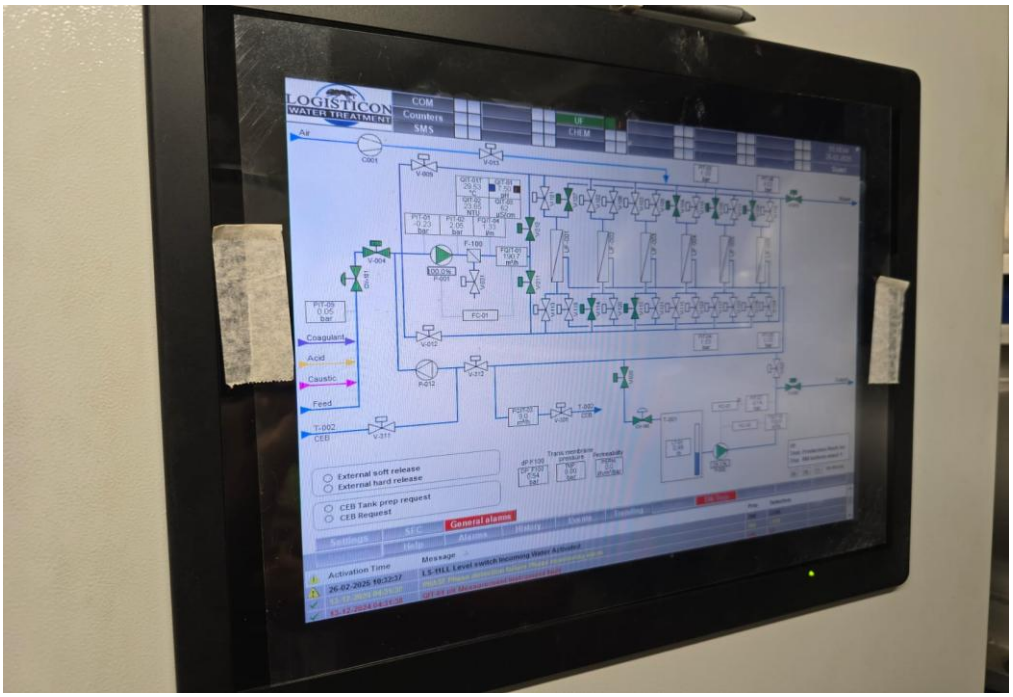


Figura 3 – Tela do sistema supervisório da ETA de Paudalho-PE, com monitoramento em tempo real.

d) Indicadores de resiliência e sustentabilidade:

Do ponto de vista de resiliência hídrica, a região da Mata Norte apresentou notável melhora em indicadores pós-implantação. A vulnerabilidade do sistema à seca diminuiu, refletida na redução de 40% no volume de água transportado por carros-pipa no ano seco subsequente, em comparação com anos anteriores (dados internos da COMPESA). Esse dado sugere que a nova ETA conseguiu suprir demandas que antes eram atendidas por meios emergenciais, evitando assim emissões de carbono associadas (caminhões percorrendo longas distâncias), uma contribuição mensurável à mitigação climática. Adicionalmente, o Índice de Continuidade do Abastecimento (medido pelo número de horas de fornecimento de água por dia para os usuários) subiu significativamente em Paudalho e cidades atendidas. A COMPESA, em seu Relatório Integrado de Sustentabilidade, destacou a instalação da ETA de ultrafiltração de Paudalho como um dos projetos-chave para alcance de metas de universalização e resiliência, beneficiando diretamente 140 mil pessoas e servindo de modelo para expansões semelhantes em outras regiões do estado. De fato, com base nesse sucesso, outras unidades de ultrafiltração foram planejadas, por exemplo, uma ETA compacta de 20 L/s em São José do Egito (Sertão) para beneficiar 20 mil pessoas, demonstrando uma replicabilidade da iniciativa.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos com o sistema de ultrafiltração em Paudalho confirmam a hipótese de que tecnologias de membranas, quando devidamente integradas a sistemas de abastecimento, podem **aumentar a resiliência hídrica** e melhorar a qualidade do serviço de forma significativa.

Resiliência hídrica e operação em condições extremas: A capacidade do novo sistema em lidar com condições extremas de água bruta (alta turbidez, floração de algas/cianobactérias) sem interrupção prolongada é um ganho substancial. Tradicionalmente, ETAs convencionais enfrentam grandes desafios nessas situações – filtros rápidos podem saturar rapidamente ou necessitar de incremento de dosagem química, e por vezes o tratamento precisa ser suspenso até a melhora da qualidade do manancial. Com a ultrafiltração, observou-se que mesmo picos muito elevados de turbidez (centenas de NTU) puderam ser administrados: o pré-tratamento removia a maior parte dos sólidos grossos e a membrana barrava o remanescente, assegurando turbidez de saída <0,3 NTU. Isso se traduz em resiliência operacional, pois o sistema pode continuar fornecendo água potável segura durante e imediatamente após eventos climáticos críticos (fortes chuvas), quando a população mais necessita e quando, sem essa tecnologia, possivelmente enfrentaria desabastecimento. Essa característica também representa **adaptação climática**: em um cenário de mudanças climáticas, espera-se aumento na variabilidade hídrica, com períodos de secas mais intensas e chuvas mais concentradas – a ultrafiltração dá flexibilidade ao sistema para operar nesses novos extremos

Gestão hídrica integrada e planejamento estratégico: O caso de Paudalho ilustra a importância de planejamento de **curto, médio e longo prazo** na gestão de sistemas de abastecimento. A curto prazo, a medida solucionou uma crise iminente de abastecimento na Mata Norte; a médio e longo prazo, ela foi concebida dentro de um plano estratégico maior da companhia (como evidenciado nos documentos estratégicos) visando ampliar a infraestrutura hídrica de forma modular. Essa modularidade é um ponto a destacar: módulos compactos de ultrafiltração podem ser adicionados conforme a demanda cresce ou conforme novos mananciais forem integrados, o que é uma abordagem alinhada ao conceito de escalabilidade em resiliência. Além disso, por serem móveis em última instância (podem ser realocados com relativo facilidade), tais unidades conferem à COMPESA capacidade de resposta a emergências em qualquer local, por exemplo, pode ser deslocadas temporariamente para atender outra cidade em crise, se necessário, reforçando a **resiliência do sistema hídrico regional como um todo**.

Eficiência energética e operacional: Um ponto que merece consideração é o **trade-off energético** da ultrafiltração em relação a tratamentos convencionais. Membranas operam sob pressão (neste caso, TMP variando de 0,4 a 2 bar e requerem bombeamento contínuo, o que tipicamente implica maior consumo energético. No entanto, compensou-se esse efeito com medidas de eficiência: uso de motores e equipamentos de alto rendimento (conforme as normas NTC-010 e NTC-137 da COMPESA já mencionadas), automação para otimizar ciclos e minimizar desperdícios, e operação em fluxo constante, que evita picos de consumo. Assim, o consumo específico obtido (0,8 a 1,2 kWh/m³) mostrou-se aceitável para o contexto. Em contrapartida, a **eficiência de uso da água** é superior: enquanto filtros convencionais podem desperdiçar 3-5% da água em retrolavagens, o sistema de membranas, com reúso interno de água de backwash tratada e CIP, desperdiça percentual similar ou menor e produz uma água de melhor qualidade. Essa maior eficiência no uso do recurso hídrico é outro aspecto da sustentabilidade do projeto, especialmente valioso em regiões semiáridas – cada metro cúbico aproveitado conta.

Aplicação da metodologia Six Sigma (DMAIC): A incorporação de práticas de gestão operacional no gerenciamento e otimização do projeto também merece reflexão. A metodologia DMAIC provou ser útil, por exemplo, na fase de análise, ao comparar alternativas com base em dados e no cálculo de benefícios, e na fase de controle, ao estabelecer uma rotina de monitoramento dos indicadores chave de performance do sistema de Paudalho. Embora usualmente aplicada na indústria para controle de qualidade de processos, aqui foi adaptada para o contexto de saneamento, focando na qualidade da água e confiabilidade do abastecimento (como "produtos" finais). Um exemplo concreto foi a definição do *desvio padrão* aceitável na turbidez de saída e na eficiência de remoção de partículas: ao monitorar continuamente esses parâmetros, foi possível determinar estatisticamente se o processo estava sob controle ou se havia *outsiders* indicando alguma anormalidade (como ensuciação precoce das membranas, necessidade de CIP, etc.). A cultura de base de dados e melhoria contínua fomentada por essa abordagem está alinhada com a evolução das companhias de saneamento rumo a operações mais inteligentes (Smart Water Management). Ademais, a comunicação de resultados foi contemplada através de relatórios periódicos e da divulgação do sucesso do projeto em canais internos e externos, valorizando a

transparência e prestação de contas. Isso reforça a confiança dos gestores públicos e da população nas soluções implementadas.

Monitoring & Evaluation (M&E) de iniciativas climáticas: Este projeto pode ser visto tanto sob a ótica de adaptação quanto mitigação climática, e a mensuração de seus impactos é fundamental. Em termos de **mitigação**, conforme mencionado, a redução de operações emergenciais carbono intensivas (como carros-pipa) e a garantia de eficiência energética no tratamento contribuem para menores emissões. Um possível aprimoramento futuro seria integrar fontes renováveis de energia (por exemplo, painéis solares) para suprir parte da demanda elétrica da ETA, tornando-a próxima de neutra em carbono, uma meta alinhada às políticas de mudança do clima. Já em termos de **adaptação e resiliência**, métricas como o aumento do índice de atendimento de água (IAA) e redução de vulnerabilidade de abastecimento estão sendo acompanhadas. A própria meta de universalização do abastecimento até 2033, estabelecida pelo novo marco legal, ganha tração com projetos como este. A COMPESA, ao incorporar essas metas em seu planejamento estratégico e relatórios, realiza a devida **avaliação de resiliência (ReM&E)** dos investimentos: por exemplo, monitorando quantas pessoas deixaram de sofrer racionamento ou passaram a ter água de qualidade mesmo sob estresse hídrico. Tais indicadores são cruciais para justificar a escalação de investimentos semelhantes e para aprendizado institucional.

Em suma, a análise dos resultados do caso de Paudalho evidencia que o uso de módulo de ultrafiltração compacto atingiu os propósitos delineados e fornece lições importantes. A tecnologia demonstrou não ser apenas viável, mas desejável em contextos de recursos hídricos vulneráveis, desde que acompanhada de bom planejamento e aderence a padrões técnicos. Alguns desafios futuros ainda existem, por exemplo, garantir a manutenção financeira de sistemas mais avançados (custos de membranas, peças de reposição) e capacitar continuamente as equipes, mas o sucesso inicial é um passo firme em direção a um serviço de água mais resiliente, seguro e sustentável em Pernambuco.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A implementação da Estação de Tratamento de Água compacta com ultrafiltração em Paudalho-PE, conduzida pela COMPESA, constitui um **marco tecnológico e estratégico** no contexto do abastecimento público de água em regiões sujeitas a eventos climáticos adversos. Com base no estudo de caso apresentado, podem-se formular as seguintes conclusões e recomendações:

- **Viabilidade técnica comprovada:** O sistema de ultrafiltração atendeu plenamente às expectativas de aumento de oferta e melhoria da qualidade da água. Atingiu-se um acréscimo de 50 L/s na produção, beneficiando cerca de 150 mil pessoas, e a água distribuída apresentou excelente qualidade (turbidez < 0,1 NTU, ausência de patógenos indicadores), mesmo sob condições severas de água bruta. Isso confirma que tecnologias de membrana são aplicáveis em larga escala no setor de saneamento brasileiro, inclusive integradas a sistemas existentes.

- **Resiliência hídrica ampliada:** A nova ETA compacta aumentou a robustez do sistema Paudalho frente a secas e enchentes, assegurando continuidade operacional onde antes ocorriam interrupções. Dessa forma, a iniciativa serve como medida de adaptação às mudanças climáticas, reduzindo a vulnerabilidade de comunidades inteiras à escassez hídrica. Recomenda-se que companhias de saneamento em regiões semiáridas considerem a ultrafiltração (e outras membranas, como osmose reversa para dessalinização quando pertinente) como parte de seus *toolkits* de resiliência.

- **Eficiência operacional e energética:** Embora haja um custo energético associado às membranas, o projeto mostrou que, seguindo padrões técnicos rigorosos (e.g. NTC-010, NTC-026, NTC-137 da COMPESA) e usando equipamentos eficientes, é possível manter consumos específicos razoáveis. Adicionalmente, a automação reduz custos operacionais e melhora o controle de processo. Recomenda-se a continuidade de programas de eficiência energética, como o aproveitamento de energia solar fotovoltaica nas instalações e a seleção de equipamentos com selo de eficiência (por exemplo, bombas com selo Procel), para compensar o consumo das membranas e caminhar para neutralidade de carbono.

- **Adoção de padrões e capacitação:** O sucesso de Paudalho deveu-se em parte à adoção de normas técnicas e padrões de projeto robustos, bem como ao treinamento intensivo da equipe. O cumprimento de normas como a N-1550 da Petrobras (pintura anticorrosiva de estruturas) e das NTCs da COMPESA garantiu qualidade na construção e montagem, enquanto a capacitação em operação de membranas e em ferramentas de melhoria contínua (Six Sigma) garantiu que a equipe local estivesse preparada para gerir a nova tecnologia. Assim, para replicação, recomenda-se desenvolver manuais operacionais específicos para sistemas de ultrafiltração e promover certificações Green Belt ou similares para os gestores desses projetos, de forma a institucionalizar a cultura de otimização e uso de dados.

- **Monitoramento contínuo e M&A:** Por fim, destaca-se a importância de um adequado monitoramento e avaliação pós-implementação. Somente com a medição contínua de indicadores de desempenho, de qualidade da água, de satisfação dos usuários e de impactos (como redução de emissões indiretas, melhoria da saúde pública etc.) é possível comprovar e comunicar os benefícios de investimentos desse tipo. O caso de Paudalho já integra os relatórios de sustentabilidade da companhia, o que é positivo. Recomenda-se aprofundar esse M&A, talvez em cooperação com instituições acadêmicas, para publicar estudos de performance de longo prazo das membranas em contextos tropicais e semiáridos, contribuindo assim para a literatura técnica e para o aperfeiçoamento futuro dos projetos.

Em conclusão, o uso de módulos de ultrafiltração compactos em sistemas de abastecimento, exemplificado por Paudalho-PE, mostrou-se uma **solução eficaz para fortalecer a resiliência hídrica** e assegurar água de qualidade à população, alinhando-se às metas de sustentabilidade e clima. A expansão dessas iniciativas, acompanhada de boas práticas de gestão e avaliação, pode desempenhar um papel crucial no alcance da segurança hídrica em Pernambuco e em outras regiões enfrentando desafios semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COMPESA (2024a). Governo de Pernambuco amplia abastecimento de água na Mata Norte – Notícia em 27 de junho de 2024. Disponível em: servicos.compesa.com.br. (Acesso em 10/06/2025).

2. COMPESA (2025). Relatório Integrado de Administração e Sustentabilidade 2025 – *Análise das Metas e Resultados*. Recife: COMPESA. Trecho disponível em: servicos.compesa.com.br (Instalação da ETA de ultrafiltração de 50 L/s no Paudalho).

3. COMPESA (2020/2021). Norma Técnica da COMPESA NTC-010-12 – Motor Elétrico de Baixa Tensão. Recife: Diretoria de Tecnologia. Revisões vigentes até 25/08/2021. Trecho: “O motor elétrico deve ser certificado pelo INMETRO... em conformidade com a NBR 17094”.

4. COMPESA (2020). Norma Técnica da COMPESA NTC-026 – Quadro de Comando de Baixa Tensão Abrigado (Partida Direta, Soft-starter ou Inversor). Recife: DDS/GEO.

5. COMPESA (2021). Norma Técnica da COMPESA NTC-137 – Especificação de Conjunto Motor-Bomba para Transferência de Produtos Químicos (trecho exemplificativo). Trecho: “Motor de alto rendimento conforme NBR 17094; ... apto a operar com inversor de frequência; ... IP55”.

6. PETROBRAS (2022). Norma Técnica Petrobras N-1550 Rev. G (11/2022) – Procedimento para Seleção de Esquemas de Pintura Externa de Estruturas Metálicas. Rio de Janeiro: Petrobras. Trecho do escopo: “Esta Norma fixa o procedimento para seleção dos esquemas de pintura externa de estruturas metálicas de aço carbono em instalações terrestres...”.

7. COMPESA (2023). *Anexo VI – Termo de Referência:* Implantação de ETA Compacta de Ultrafiltração – Paudalho. Documento interno COMPESA (licitação). Trechos citados: critérios de dimensionamento e qualidade da água, especificação de bombas e módulos, etc.

8. Ministério da Saúde (2021). Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. *Anexo XX – Padrões de Potabilidade da Água para Consumo Humano.* Brasília: MS. (Estabelece turbidez <0,3 NTU, ausência de coliformes, log-removal para protozoários, entre outros parâmetros para água segura).