SISTEMA INTEGRADO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS, EFLUENTES E DESMINERALIZAÇÃO DE ALTA PERFORMANCE PARA USINA TERMELÉTRICA DE CICLO COMBINADO EM MANAUS

Talita Rubiete Pires Carvalho[(1)]
Engenheira Mecânica pela FEI e pós-graduanda em Gestão de Projetos. Diretora Comercial e líder do pilar de Inovação da Ecosan, possui mais de 10 anos de experiência no setor de saneamento, com atuação em soluções e projetos voltados ao tratamento de água e efluentes.
André Ricardo Telles[(2)]
CEO da Ecosan, empresa especializada em soluções para tratamento de água e recuperação de efluentes. Pós-Graduado em Inovação na Universidade CUOA, na Itália, e possui MBA pela FGV, com atuação em gestão, inovação e desenvolvimento de soluções aplicadas ao setor de saneamento.

Endereço[(1)]**:** R. das Monções, 420 - 9º andar - Jardim, Santo André - SP, 09090-521 - Brasil - Tel +55 (11) 3468-3800 – talita.carvalho@ecosan.com.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implantação de um Sistema Integrado de Tratamento de Águas, Efluentes e Desmineralização de Alta Performance para uma Usina Termelétrica de Ciclo Combinado em Manaus, concebido pela Ecosan com foco em confiabilidade operacional, eficiência hídrica, automação e conformidade ambiental. O sistema foi projetado para tratar água bruta de poços profundos, produzindo múltiplas qualidades de água e assegurando água desmineralizada para caldeiras. O tratamento integra descarbonatação, ultrafiltração, osmose reversa e polimento por leito misto. Paralelamente, o sistema de efluentes trata integralmente *blowdowns*, drenos oleosos e efluentes químicos, atendendo à Resolução nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). O projeto destaca-se pela automação e integração operacional, com potencial para aumentar a segurança operacional, reduzir intervenções manuais e otimizar recursos, consolidando-se como solução sustentável e estratégica para o setor termoelétrico.

PALAVRAS-CHAVE: Desmineralização, Automação Industrial, Osmose Reversa.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por eficiência hídrica, confiabilidade operacional e conformidade ambiental em empreendimentos industriais de grande porte impulsiona o desenvolvimento de sistemas de tratamento de água e efluentes cada vez mais robustos, integrados e tecnologicamente avançados. No setor termoelétrico, a qualidade da água utilizada nos processos possui impacto direto sobre a eficiência energética, a vida útil dos equipamentos, a segurança operacional e a sustentabilidade ambiental, sobretudo em sistemas de geração de vapor de alta pressão.

Nesse contexto, sistemas de tratamento capazes de produzir múltiplas qualidades de água e promover o adequado gerenciamento dos efluentes, conforme as melhores práticas de projeto detalhadas em Crittenden et al. (2012), tornam-se fundamentais para a operação segura e contínua das plantas. A evolução das tecnologias de separação por membranas, como a ultrafiltração (UF) e a osmose reversa (OR), amplamente discutida em manuais técnicos de referência (AWWA, 2016; 2022; KUCERA, 2023), aliada a estratégias de automação e controle de processos (SHINSKEY, 1996; SMITH, 2010), possibilita a criação de sistemas com elevado desempenho e mínima intervenção operacional.

Figura 1 – Representação 3D renderizada do sistema completo



Fonte: elaboração própria.

Visando atender às rigorosas necessidades operacionais de uma nova Usina Termelétrica de Ciclo Combinado em Manaus, a Ecosan desenvolveu um Sistema Integrado de Tratamento de Águas, Efluentes e Desmineralização de Alta Performance. O projeto foi concebido para transformar uma única fonte de água subterrânea proveniente de poços profundos em múltiplas correntes de água com requisitos de qualidade distintos, destinadas ao abastecimento industrial, consumo humano, reposição de sistemas de resfriamento e alimentação de caldeiras de geração de vapor.

O sistema foi dimensionado para produzir e tratar uma vazão total de aproximadamente 217,5 m³/h de água para diferentes aplicações industriais, além de possuir capacidade para tratamento de até 124 m³/h de efluentes gerados pela usina termelétrica. A solução contempla a produção integrada de 195 m³/h de água para reposição da torre de resfriamento, 7 m³/h de água tratada para consumo geral da planta, 0,5 m³/h de água potável para consumo humano, até 7 m³/h de água para reposição dos resfriadores evaporativos e 15 m³/h de água desmineralizada para alimentação das caldeiras. Paralelamente, foi concebido um Sistema de Tratamento de Efluentes com capacidade de 124 m³/h, responsável pelo tratamento integral das correntes líquidas geradas na usina.

O projeto incorpora tecnologias avançadas de descarbonatação, ultrafiltração, osmose reversa, troca iônica, clarificação e automação industrial, permitindo elevada confiabilidade operacional, segurança de processo e conformidade com os requisitos ambientais e de potabilidade aplicáveis.

OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento do Sistema Integrado de Tratamento de Águas, Efluentes e Desmineralização de Alta Performance projetado para atendimento das demandas operacionais da usina termelétrica, destacando:

- A produção de diferentes qualidades de água para aplicações industriais e potáveis;
- A garantia de fornecimento de água desmineralizada para alimentação de caldeiras;
- O tratamento integral dos efluentes industriais gerados na planta;
- O atendimento aos requisitos ambientais estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011 e pela Portaria GM/MS nº 888/2021;
- A aplicação de tecnologias avançadas com elevado desempenho operacional;
- A implementação de sistema automatizado visando segurança, confiabilidade e redução de esforço operacional.

METODOLOGIA UTILIZADA

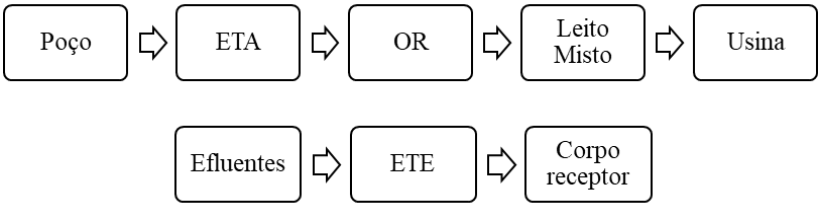
O sistema foi concebido a partir da caracterização detalhada da água bruta, proveniente de poços profundos, e das rigorosas especificações operacionais da usina termelétrica, considerando os requisitos de qualidade para cada aplicação industrial.

Tabela 1 – Capacidades de projeto do sistema integrado

Corrente Produzida	Vazão (m³/h)
Água para reposição da torre de resfriamento	195
Água tratada para consumo geral	7
Água potável para consumo humano	0,5
Água para reposição do resfriador evaporativo	7
Água desmineralizada para caldeira	15
Tratamento total de água	217,5
Tratamento de efluentes	124

Fonte: elaboração própria.

Figura 2 – Integração geral do sistema: Estação de Tratamento de Água (ETA), Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) e Osmose Reversa (OR)



Fonte: elaboração própria.

O Sistema de Tratamento de Águas foi desenvolvido para a produção das seguintes correntes: água de make-up da torre de resfriamento, água de consumo geral, água potável para consumo humano, água de reposição do resfriador evaporativo e água desmineralizada para alimentação de caldeiras. Para atender a essas diferentes especificações, foi projetada uma cadeia de tratamento integrando operações unitárias de alta eficiência.

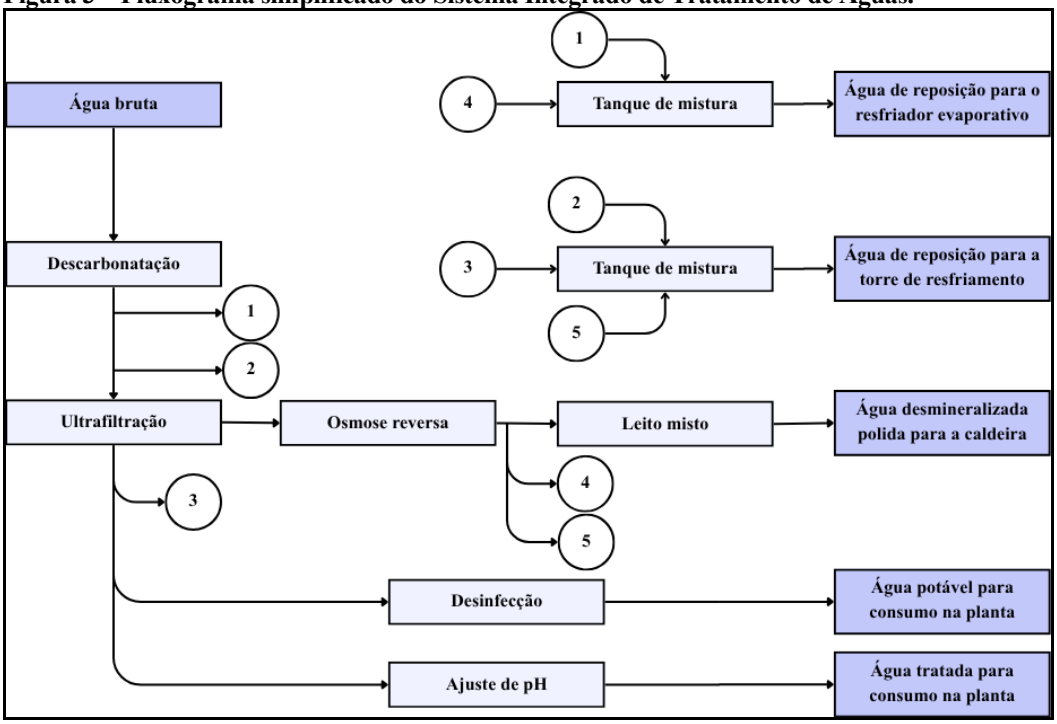
Tabela 2 – Principais características da água bruta de projeto

Parâmetro	Valor
pH	5,5 a 7,0
Condutividade	< 180 µS/cm
SDI	6,36
Dureza Total	< 33,2 ppm $CaCO_3$
Sílica Reativa	47 ppm
Sílica Coloidal	11 ppm
TDS	< 160 ppm
Turbidez	< 5 NTU

Fonte: Ecosan (2026).

A primeira etapa consiste em uma descarbonatação, incorporada ao processo em função das características hidroquímicas da água subterrânea utilizada pela usina. A combinação entre pH naturalmente ácido (5,5 a 7,0) e alcalinidade relativamente baixa indica a presença significativa de dióxido de carbono livre dissolvido. A remoção desse gás antes das etapas subsequentes reduz a demanda por agentes alcalinizantes, minimiza a introdução de sólidos dissolvidos ao sistema e melhora o desempenho global dos processos de membranas. Para essa finalidade foram especificadas torres de descarbonatação preenchidas com anéis Pall, operando em contracorrente ar-água, promovendo o stripping do CO_2 dissolvido e elevando naturalmente o pH da água para valores próximos à neutralidade.

Figura 3 – Fluxograma simplificado do Sistema Integrado de Tratamento de Águas.



Fonte: elaboração própria.

Na sequência, a ultrafiltração atua como uma barreira física para sólidos suspensos, turbidez e material coloidal, desempenhando um papel crítico como pré-tratamento para proteger as membranas de osmose reversa, conforme descrito no Manual M53 - *Microfiltration and Ultrafiltration Membranes, da American Water Works Association* (AWWA, 2016).

O sistema de ultrafiltração foi concebido com três trens independentes operando segundo filosofia de redundância operacional. Essa configuração permite que um dos trens seja retirado temporariamente para execução de retrolavagens automáticas, retrolavagens quimicamente assistidas (*Chemically Enhanced Backwash* - CEB) ou intervenções programadas sem comprometer a produção global de água tratada. As sequências de retrolavagem e limpeza química são iniciadas automaticamente pelo sistema de controle, reduzindo a necessidade de intervenção operacional e assegurando estabilidade de desempenho ao longo da vida útil das membranas.

A etapa de desmineralização, considerada o núcleo do sistema de produção de água de alta pureza, é realizada por osmose reversa. O processo foi projetado com quatro trens paralelos independentes, cada um equipado com bomba de alta pressão dedicada, proporcionando elevada disponibilidade operacional e flexibilidade para manutenção. Cada trem opera em configuração de dois estágios, com arranjo hidráulico composto por quatro vasos de pressão no primeiro estágio e dois vasos no segundo estágio. A recuperação global projetada é de 75%, resultando em uma produção de 25 m³/h de permeado para cada 33,3 m³/h de alimentação e geração de apenas 8,3 m³/h de concentrado. O projeto do sistema de osmose reversa, incluindo a seleção das membranas e a configuração hidráulica, foi pautado por guias técnicos especializados (AWWA, 2022; KUCERA, 2023).

Tabela 3 – Principais parâmetros de projeto da osmose reversa

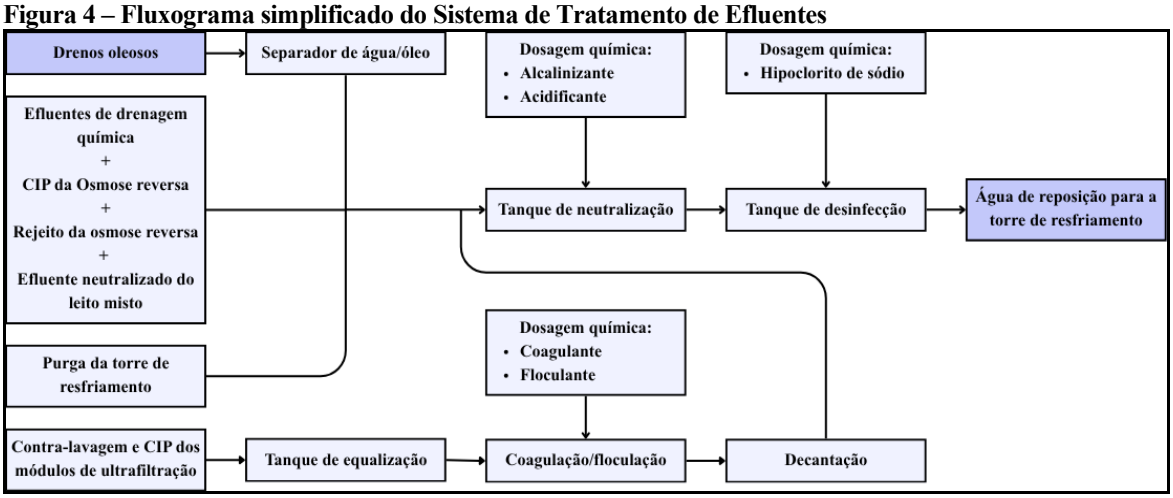
Parâmetro	Valor
Número de trens	4
Recuperação	75 %
Alimentação por trem	33,3 m³/h
Produção de permeado	25 m³/h
Rejeito gerado	8,3 m³/h
Estágios por trem	2

Fonte: elaboração própria.

O polimento final por trocador de leito misto, seguindo os fundamentos de projeto de troca iônica (AWWA, 1995), assegura a produção contínua de água com a alta pureza exigida para a alimentação das caldeiras da usina. O sistema

de polimento final foi dimensionado para assegurar a produção contínua de água desmineralizada com condutividade específica inferior a 0,1 µS/cm, sílica total inferior a 10 ppb, sódio inferior a 3 ppb, cobre inferior a 1 ppb e ferro total inferior a 5 ppb, atendendo aos rigorosos requisitos de qualidade exigidos para alimentação de caldeiras de alta pressão.

Figura 4 – Fluxograma simplificado do Sistema de Tratamento de Efluentes



Fonte: elaboração própria.

Paralelamente, foi implantado um Sistema de Tratamento de Efluentes destinado a receber e tratar um espectro complexo de correntes, incluindo efluentes químicos da desmineralização, *blowdowns* da torre de resfriamento, contralavagens dos filtros, soluções de limpeza química das membranas, drenos oleosos e efluentes das áreas de armazenamento de produtos químicos. A concepção do tratamento, ancorada nos conceitos de gestão de efluentes industriais (SANTOS; LANGE, 2017), integra as etapas de separação água-óleo, clarificação, neutralização, desinfecção e, por fim, adensamento e desaguamento do lodo gerado, configurando uma solução completa que antecede o descarte em corpo hídrico.

Todo o sistema foi projetado com um elevado nível de automação e monitoramento contínuo. A integração operacional foi desenvolvida com base em estratégias de controle de processos que visam garantir a estabilidade, a segurança e a redução da dependência de intervenções manuais, princípios fundamentais da engenharia de controle moderna (SHINSKEY, 1996; SMITH, 2010). Além do elevado grau de automação local, o sistema foi concebido com infraestrutura compatível para operação e supervisão remotas, permitindo acompanhamento contínuo dos principais parâmetros operacionais, rastreabilidade dos processos e suporte especializado à distância.

RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento do Sistema Integrado de Tratamento de Águas permitiu estabelecer uma solução capaz de produzir simultaneamente cinco diferentes qualidades de água a partir de uma única fonte subterrânea, atendendo aos requisitos específicos das diversas aplicações da usina termelétrica.

A combinação entre descarbonatação, ultrafiltração, osmose reversa e polimento por troca iônica foi projetada para assegurar elevada eficiência na remoção de sólidos suspensos, sílica coloidal, matéria orgânica, sais dissolvidos e contaminantes inorgânicos.

Para a corrente de água desmineralizada destinada à alimentação das caldeiras, o sistema foi concebido para atingir condutividade específica inferior a 0,1 µS/cm, sílica total inferior a 10 ppb e concentrações extremamente reduzidas de sódio, cobre e ferro, compatíveis com aplicações de alta criticidade operacional.

No sistema de tratamento de efluentes, a integração entre separação água-óleo, equalização, coagulação, floculação, decantação, neutralização e desinfecção foi projetada para atender aos requisitos da Resolução CONAMA nº 430/2011 para lançamento em corpo hídrico receptor.

O elevado grau de automação incorporado ao projeto, somado à infraestrutura de operação e supervisão remotas, permitem monitoramento contínuo de parâmetros operacionais críticos, incluindo vazão, pressão, temperatura, pH, nível e condutividade, rastreabilidade dos processos e suporte especializado à distância,

contribuindo para a segurança operacional, redução da dependência de intervenções manuais, redução do tempo de resposta a eventuais desvios de processo e possibilitando uma gestão mais eficiente dos ativos instalados.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A adoção de tecnologias avançadas de separação por membranas, associadas a sistemas automatizados, apresenta potencial para elevada eficiência para aplicações industriais de grande porte e alta criticidade operacional.

A utilização da ultrafiltração como pré-tratamento da osmose reversa, uma configuração amplamente recomendada na literatura técnica (AWWA, 2016; KUCERA, 2023), proporcionou maior estabilidade operacional e um aumento significativo da vida útil das membranas, reduzindo os riscos de incrustação e *fouling*. A combinação entre osmose reversa e leito misto (AWWA, 1995; AWWA, 2022) permitiu atingir os elevados padrões de pureza da água, essenciais para a proteção dos equipamentos térmicos e para o aumento da eficiência energética da usina.

No tratamento de efluentes, a integração entre separação físico-química e processos de estabilização, conforme metodologias para efluentes complexos (SANTOS; LANGE, 2017), garantiu uma elevada robustez operacional mesmo diante da variabilidade intrínseca das correntes geradas em uma planta termelétrica. A aplicação dos fundamentos de engenharia de tratamento (METCALF & EDDY, 2014) foi decisiva para a eficiência e a confiabilidade do processo.

Um dos principais diferenciais do projeto consiste na integração de todas as etapas de tratamento de água, produção de água desmineralizada e tratamento de efluentes em uma única arquitetura operacional. Essa abordagem permitiu centralizar estratégias de controle, reduzir interfaces operacionais e aumentar a confiabilidade global do empreendimento. Adicionalmente, a adoção de filosofias de redundância em equipamentos críticos, como ultrafiltração, osmose reversa, bombas de processo e trocadores de leito misto, proporciona elevada disponibilidade operacional, característica essencial para sistemas de utilidades em usinas termelétricas de ciclo combinado.

Outro aspecto relevante e diferencial do projeto refere-se à automação integrada. A implementação de uma arquitetura de controle de processos bem projetada e sintonizada (SHINSKEY, 1996), complementada por estratégias de controle avançado que vão além das malhas simples (SMITH, 2010) contribuirá diretamente para a maior segurança operacional, rastreabilidade dos processos e drástica redução da dependência de intervenções humanas, características cada vez mais estratégicas para plantas industriais modernas. O sistema também se destaca sob a ótica ambiental, promovendo uma gestão eficiente dos recursos hídricos, a redução de impactos e a conformidade legal.

Como estratégia complementar para maximização da confiabilidade operacional, o empreendimento contará com um período de operação assistida de dois anos conduzido pela equipe técnica da Ecosan. Durante esse período serão realizados acompanhamento operacional, avaliação de desempenho, suporte técnico especializado e otimização contínua dos parâmetros de processo, contribuindo para a estabilidade do sistema e para a transferência de conhecimento às equipes responsáveis pela operação da planta.

CONCLUSÕES

O Sistema Integrado de Tratamento de Águas, Efluentes e Desmineralização de Alta Performance desenvolvido pela Ecosan apresenta potencial para elevada eficiência operacional, confiabilidade e total aderência às exigências ambientais e industriais aplicáveis ao setor termoelétrico.

A integração de tecnologias avançadas de tratamento, fundamentadas em normas e literatura técnica de referência, associada a um elevado e inteligente nível de automação, permitiu a produção segura de múltiplas qualidades de água e o tratamento integral dos efluentes gerados pela usina.

O sistema desenvolvido demonstra o potencial das tecnologias avançadas de separação por membranas, troca iônica, automação industrial e tratamento físico-químico para aplicações industriais de elevada criticidade. A capacidade de produzir simultaneamente múltiplas correntes de água com requisitos distintos, associada ao tratamento integral dos efluentes gerados, consolida a solução como uma referência em eficiência hídrica, confiabilidade operacional e sustentabilidade ambiental para o setor de geração termoelétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). M38 - *Electrodialysis and Ion-Exchange*. 1. ed. Denver: AWWA, 1995.

2. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). M46 - *Reverse Osmosis and Nanofiltration*. 3. ed. Denver: AWWA, 2022.

3. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). M53 - *Microfiltration and Ultrafiltration Membranes for Drinking Water*. 2. ed. Denver: AWWA, 2016.

4. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011.

5. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 maio 2021.

6. CRITTENDEN, J. C. et al. MWH's *Water Treatment: Principles and Design*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

7. KUCERA, J. (Ed.). *Reverse Osmosis: Design, Processes, and Applications for Engineers*. 3. ed. Beverly: Scrivener Publishing, 2023.

8. METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

9. SANTOS, A. B. dos; LANGE, L. C. (Coord.). Tratamento e gestão de efluentes industriais. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

10. SHINSKEY, F. G. *Process Control Systems: Application, Design, and Tuning*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1996.

11. SMITH, C. L. *Advanced Process Control: Beyond Single-Loop Control*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.