

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA TERCIÁRIO/QUATERNÁRIO EM UMA ETE MUNICIPAL

Aline Barreto Graebin – alinebgraebin@fluenteambiental.com

NESA, PPG-IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Av. Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronomia

91509-900 – Porto Alegre – RS.

Fernando Jorge Corrêa Magalhães Filho – fernando.magalhaes@ufrgs.br

NESA, PPG-IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Salatiel Wohlmuth da Silva – salatiel.silva@ufrgs.br

NESA, PPG-IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo: A crescente presença de contaminantes de preocupação emergente (CPEs) em efluentes sanitários e a necessidade de aprimoramento da remoção de nutrientes têm impulsionado a adoção de tecnologias avançadas de tratamento. Neste contexto, este estudo avaliou a viabilidade técnico-econômica da implantação da nanofiltração (NF) como etapa terciária/quaternária em uma estação de tratamento de esgoto (ETE) municipal. A avaliação foi baseada em dados obtidos em unidade piloto de NF operada com efluente tratado da ETE, sob pressões de 6, 8 e 10 bar. A partir dos resultados experimentais, foi realizado o dimensionamento de um sistema em escala plena para atendimento da vazão média de 216 m³/h, considerando recuperação de 75%. O sistema dimensionado apresentou área total de membranas de aproximadamente 9.717 m², composta por 263 módulos distribuídos em 44 vasos de pressão, com consumo energético específico estimado em 1,90 kWh/m³. A análise econômica indicou investimento inicial da ordem de R\$ 5,09 milhões, enquanto os custos operacionais foram fortemente influenciados pelo consumo de energia elétrica, principal componente do OPEX. O custo operacional unitário do tratamento foi estimado em R\$ 2,49/m³ de efluente tratado. Os resultados demonstram que a implantação da NF é tecnicamente aplicável como etapa avançada de tratamento, embora sua viabilidade econômica esteja diretamente relacionada à otimização do consumo energético. Além dos aspectos econômicos, a adoção da tecnologia apresenta benefícios associados à melhoria da qualidade do efluente, ao potencial de remoção de nutrientes e CPEs e à possibilidade de produção de água para reúso, contribuindo para a redução do lançamento de poluentes no corpo receptor e para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Nanofiltração, Reúso, Esgoto sanitário, Viabilidade técnico-econômica, Indicadores econômicos.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

TECHNO-ECONOMIC ASSESSMENT OF THE IMPLEMENTATION OF A TERTIARY/QUATERNARY TREATMENT SYSTEM AT A MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANT

Abstract The increasing occurrence of contaminants of emerging concern (CECs) in sanitary wastewater effluents and the need to improve nutrient removal have driven the adoption of advanced treatment technologies. In this context, this study evaluated the technical and economic feasibility of implementing nanofiltration (NF) as a tertiary/quaternary treatment step in a municipal wastewater treatment plant (WWTP). The assessment was based on data obtained from a pilot-scale NF unit operated with treated WWTP effluent at pressures of 6, 8, and 10 bar. Based on the experimental results, a full-scale system was designed to treat the average flow rate of 216 m³/h, considering a recovery rate of 75%. The designed system presented a total membrane area of approximately 9,717 m², comprising 263 modules distributed among 44 pressure vessels, with an estimated specific energy consumption of 1.90 kWh/m³. The economic analysis indicated an initial investment of approximately BRL 5.09 million, while operating costs were strongly influenced by electricity consumption, the main component of OPEX. The unit operating cost of treatment was estimated at BRL 2.49/m³ of treated effluent. The results demonstrate that NF implementation is technically feasible as an advanced treatment step, although its economic feasibility is directly related to optimizing energy consumption. In addition to the economic aspects, the adoption of this technology provides benefits associated with improved effluent quality, the potential removal of nutrients and CECs, and the possibility of producing water for reuse, contributing to reduced pollutant discharges into the receiving water body and to more sustainable water resources management..

Keywords: Nanofiltration, Water reuse, Domestic wastewater, Techno-economic feasibility, Economic indicators.

1. INTRODUÇÃO

A ETE em estudo, por uma Autarquia Municipal, é a principal unidade de tratamento de esgotos do município, operando desde 1995 e modernizada a partir de 2018. A estação possui capacidade de tratamento para até 8.640 m³ d⁻¹, porém opera atualmente com 5.184 m³ d⁻¹ (resultado médio do ano 2025). Considerando uma geração per capita de esgoto de 150 L·hab⁻¹ d⁻¹, valor amplamente adotado em estudos e projetos de sistemas de esgotamento sanitário no Brasil, estima-se que a ETE atenda uma população equivalente de cerca de 39.600 habitantes, o que corresponde a aproximadamente 18% da população do município, estimada em aproximadamente 220.000 habitantes segundo o Censo Demográfico de 2022 do IBGE.

Ressalta-se que a vazão afluente à ETE pode apresentar variações associadas à contribuição indevida de águas pluviais no sistema de esgotamento sanitário. Em áreas urbanas, a presença de ligações clandestinas de drenagem pluvial à rede cloacal, bem como processos de infiltração ao longo

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

da rede coletora, pode resultar no aumento da vazão afluyente durante eventos de precipitação. Essas contribuições parasitárias podem alterar temporariamente as condições hidráulicas de operação da estação, influenciando o tempo de detenção hidráulica e promovendo diluição do esgoto sanitário (RASHID; LIU, 2020; VAN ASSEL et al., 2023).

O sistema de tratamento da ETE é composto por etapas preliminar, primária, secundária e terciária, combinando processos físicos, biológicos e químicos. O tratamento preliminar é destinado à remoção de sólidos grosseiros e areia. A etapa primária é realizada por reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB/RAFA), nos quais ocorrem processos de digestão anaeróbia.

O tratamento secundário é realizado por um sistema do tipo Bardenpho, composto por câmaras anaeróbia, anóxica e aeróbia, com recirculações internas que possibilitam a remoção de nitrogênio por meio dos processos de nitrificação e desnitrificação. O tratamento terciário, físico-químico, visa à remoção adicional de nutrientes, em especial fósforo, antes do lançamento do efluente tratado no Rio dos Sinos.

Ressalta-se que a ETE opera atualmente com vazão afluyente inferior à prevista em projeto, conforme apresentado anteriormente. Além da vazão reduzida, a carga orgânica afluyente também se encontra abaixo da estimada na concepção da unidade, cuja demanda bioquímica de oxigênio (DBO) de projeto é de 350 mg L^{-1} , enquanto os valores atualmente observados são da ordem de 150 mg L^{-1} .

Nessas condições, os reatores anaeróbios do tipo UASB operam com tempo de detenção hidráulica elevado e com carga orgânica inferior à projetada. Essa configuração resulta em menor produção de lodo biológico, de modo que a remoção do lodo acumulado nesses reatores ocorre em intervalos prolongados, geralmente em periodicidade anual.

Adicionalmente, o elevado tempo de detenção hidráulica e a baixa carga orgânica afluyente contribuem para uma alta eficiência de remoção de matéria orgânica nos reatores UASB. Embora esse desempenho seja positivo do ponto de vista da remoção de DBO, ele pode influenciar o desempenho da etapa subsequente de tratamento biológico por lodos ativados, uma vez que a concentração de matéria carbonácea disponível para os microrganismos torna-se reduzida. Na ETE, a concentração média de DBO no efluente dos reatores UASB é da ordem de aproximadamente 50 mg L^{-1} , valor que pode limitar parcialmente a disponibilidade de carbono necessária aos processos biológicos de remoção de nutrientes, particularmente aqueles associados à relação C:N:P requerida para o adequado funcionamento do sistema de lodos ativados.

Observa-se ainda que a etapa de tratamento terciário da ETE, implantada no processo de modernização da estação, não se encontra em operação regular desde sua inauguração (2017) e posterior partida operacional (2019), em razão de limitações associadas ao projeto e à operação do sistema. Nesse contexto, a solução tecnológica avaliada neste estudo foi concebida para atuar como etapa complementar de tratamento avançado, podendo ser integrada à linha de tratamento da estação após o processo biológico. A NF apresenta potencial para desempenhar simultaneamente funções associadas ao tratamento terciário e quaternário: terciário, pela capacidade de remoção adicional de nutrientes e melhoria da qualidade do efluente final, e quaternário, pela retenção de CPEs, aja visto que a ETE recebe o efluente oriundo de um dos principais hospitais da região e há estudos prévios que comprovam a alta carga de CPEs de origem farmacêutica tanto no efluente bruto quanto no tratado, Essa dupla funcionalidade fundamenta o uso da denominação tratamento terciário/quaternário adotada ao longo deste trabalho.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

2. METODOLOGIA

A viabilidade técnica do processo de tratamento terciário/quaternário foi avaliada por meio da implantação e operação de uma unidade piloto. O sistema, constituído por um *skid* equipado com um módulo de NF de 4 polegadas (NF 8040), da fabricante Rauschert, foi utilizado no tratamento do efluente secundário da ETE.

A unidade operou durante um período total de 42 horas, distribuídas em ciclos intercalados sob pressões de operação de 6, 8 e 10 bar. Ao término de cada ciclo operacional, foram coletadas amostras do permeado e do concentrado, as quais permanecem em fase de análise, com o objetivo de avaliar a eficiência do sistema na remoção de nutrientes, especificamente fósforo e nitrogênio, bem como de CPEs.

Com base nos dados operacionais obtidos durante a operação da unidade piloto, foi realizado o levantamento dos custos de implantação (*Capital Expenditure* ou Despesas de Capital - CAPEX) de um sistema dimensionado para atender à vazão média atualmente tratada pela ETE. Adicionalmente, foram estimados os custos de operação e manutenção (*Operational Expenditure* ou Despesa Operacional - OPEX) da futura instalação, contemplando despesas relacionadas à substituição periódica das membranas, consumo de energia elétrica, mão de obra operacional, produtos químicos e demais custos associados ao funcionamento do sistema. Com relação aos custos indiretos, os critérios de rateio e limites percentuais aplicados foram balizados metodologicamente de acordo com as faixas para Instalações Industriais e de Saneamento do Acórdão nº 2622/2013 do Plenário do Tribunal de Contas da União (TCU) (BRASIL, 2013), atendendo os referenciais estipulados pela Caixa Econômica Federal (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2026) e em conformidade com as diretrizes vigentes de transparência orçamentária da Lei nº 14.133/2021 (Nova Lei de Licitações) (BRASIL, 2021).

As informações referentes aos equipamentos, suas vidas úteis e seus respectivos custos foram obtidas por meio de consultas aos websites dos fabricantes, complementadas por dados fornecidos pelos representantes comerciais das empresas, os quais realizaram visitas técnicas à unidade piloto durante o período de operação.

Todos os dados levantados foram organizados e sistematizados em planilhas, sendo classificados de acordo com sua natureza como CAPEX ou OPEX. A partir dessas informações, foram estabelecidos indicadores de desempenho econômico para subsidiar a avaliação da viabilidade financeira da implantação do sistema. Para formalização dos indicadores, foi utilizada uma taxa de juros anual que considerou a Taxa de Longo Prazo (TLP) do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES, 2026) e o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) (IBGE, 2026).

Os benefícios indiretos decorrentes da implementação da tecnologia, tais como o atendimento às condicionantes estabelecidas na Licença de Operação da ETE e à legislação ambiental vigente, a melhoria da qualidade do corpo hídrico receptor, os potenciais impactos positivos sobre a qualidade de vida da população residente no entorno da estação e os benefícios à saúde pública associados ao uso do corpo hídrico como manancial de abastecimento, não puderam ser quantificados devido à indisponibilidade de dados que permitissem sua mensuração.

Dessa forma, indicadores de viabilidade econômica, como a Taxa de Retorno do Investimento (TIR) e o período de retorno (*payback*), não foram calculados neste estudo, uma vez que

Realização



Apoio Institucional



REBOB

Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

os principais benefícios decorrentes da implantação do sistema apresentam natureza predominantemente social e ambiental, impossibilitando sua mensuração em termos monetários com os dados atualmente disponíveis. Entretanto, em um cenário futuro, a determinação desses indicadores poderá ser viabilizada caso o efluente tratado seja destinado ao reúso, permitindo a geração de benefícios econômicos diretos. Nesse contexto, destaca-se, em um primeiro momento, a substituição da água potável atualmente utilizada pelos caminhões de hidrojoato empregados na limpeza e desobstrução das vias públicas do município. Adicionalmente, o aproveitamento do efluente tratado para fins industriais e agrícolas poderá ampliar os benefícios econômicos associados à implantação da tecnologia, possibilitando uma avaliação mais abrangente da viabilidade financeira do investimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os dados utilizados nos levantamentos de custos.

Tabela 1: Dados de projeto essenciais para a análise de custos.

Parâmetro	Dado	Unidade	Fontes
Q _{média}	60	L/s	Dados da ETE
	216	m³/h	
	5.184	m³/dia	
	1.892.160	m³/ano	
H operação	24	h/dia	
	8.760	h/ano	
Tarifa de energia	R\$ 1,10	R\$/kW	
Recuperação das membranas (r)	0,75	*100%	Índice baseado em estudos científicos de avaliação do processo em escala piloto e dados de fabricantes de membranas
Área membrana (A _m)	37	m2	Informações dos fabricantes, padrão para membranas de 8"
Capacidade por vaso (C _v)	6	membranas	
Vida útil do sistema:			
Membranas	3	anos	Tempos de vida útil estimados com base em Manuais Técnicos e Guias de Fabricantes de Equipamentos ^{1, 2, 3, 4, 5, 6}
Equipamentos	10	anos	
Bombas	5	anos	
Instrumentação	6	anos	

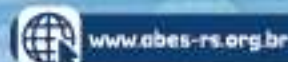
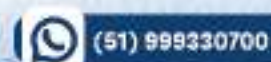
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



Estrutura (<i>skids</i>)	20	anos	
Sistema em geral (n)	9	anos	Média de todos os componentes
Indicadores econômicos			
Taxa de desconto (i)	0,125	*100%	Taxa de Longo Prazo (TLP) do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) ⁷ + Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) ⁸ = 7,80 % + 4,72%
Horizonte de análise	10	anos	
Dimensionamento simplificado			
Fluxo membrana (J)	22,23	L/m ² h	Resultado médio obtido a partir da operação da unidade piloto
Área necessária (A)	9.717	m ²	$A = Q / J$
Número módulos (N)	263	unidades	$N = A / A_m$
Número vasos (v)	44	vasos	$v = N / C_v$
Consumo de energia específico (C _e)	1,90	kWh/m ³	Dado obtido a partir da operação da unidade piloto
Consumo de energia anual (E)	3.595.104,00	kW	$E = Q * C_e$
¹ https://www.danfoss.com/en/products/hpp/pumps/high-pressure-pumps-for-reverse-osmosis-applications/#tab-overview			
² https://rohrepumps.com/what-pumps-are-used-in-an-ro-system-and-how-long-do-they-last/			
³ https://pureaqua.com/industrial-nanofiltration-nf-systems/			
⁴ https://rotainox.com.br/equipamento/osmose-reversa-para-permeados-de-nanofiltracao-e-ultrafiltracao/			
⁵ https://protonsbrasil.com.br/blog/membrana-de-osmose-reversa/			
⁶ https://bfdias.com.br/blog/membranas-osmose-reversa-tipos-vida-util/			
⁷ https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/tlp-taxa-de-longo-prazo			
⁸ https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php			

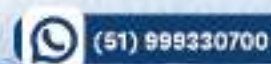
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



3.1. Estimativa do CAPEX

O investimento pode ser dividido em custos diretos e indiretos, a Tabela 2 apresenta os custos diretos ligados à implantação do sistema na ETE.

Tabela 2: Custos diretos relacionados à implantação do sistema.

Item	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Membranas NF	263	R\$ 4.350,00	R\$ 1.142.356,93
Vasos de pressão	44	R\$ 3.800,00	R\$ 166.320,17
Bombas de alta pressão	3	R\$ 60.000,00	R\$ 180.000,00
Bombas auxiliares	7	R\$ 39.000,00	R\$ 273.000,00
Tubulações (aço inox)	250	R\$ 500,00	R\$ 125.000,00
Tubulações (PVC)	250	R\$ 100,00	R\$ 25.000,00
Conexões (aço inox)	320	R\$ 750,00	R\$ 240.000,00
Conexões (PVC)	280	R\$ 50,00	R\$ 14.000,00
Válvulas (aço inox)	16	R\$ 3.800,00	R\$ 60.800,00
Válvulas (PVC)	18	R\$ 1.000,00	R\$ 18.000,00
Instrumentação	16	R\$ 10.000,00	R\$ 160.000,00
Painéis elétricos	2	R\$ 140.000,00	R\$ 280.000,00
CLP e automação	2	R\$ 27.500,00	R\$ 55.000,00
Sistema CIP	2	R\$ 18.000,00	R\$ 36.000,00
Tanque (100 m3)	2	R\$ 45.000,00	R\$ 90.000,00
Tanque (5 m3)	2	R\$ 25.000,00	R\$ 50.000,00
Estrutura metálica	2	R\$ 55.000,00	R\$ 110.000,00
Bacias de contenção	4	R\$ 30.000,00	R\$ 120.000,00
Obras civis	1	R\$ 350.000,00	R\$ 350.000,00
Instalação hidráulica	1	R\$ 290.000,00	R\$ 290.000,00
Instalação elétrica	1	R\$ 180.000,00	R\$ 180.000,00
Montagem eletromecânica	1	R\$ 490.000,00	R\$ 490.000,00
Subtotal			R\$ 3.965.477,10

Na Tabela 3 são mostrados os custos indiretos de CAPEX.

Tabela 3: Custos indiretos relacionados à implantação do sistema.

Item	Referência	Valor Total (R\$)
Projeto executivo	5% do custo direto	R\$ 198.273,85

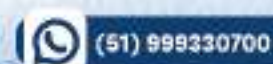
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



Licenciamento	Estimado pelas taxas e custos de estudos ambientais	R\$ 70.000,00
Supervisão	3,5% do custo direto	R\$ 138.791,70
Comissionamento	2,5% do custo direto	R\$ 99.136,93
Treinamento	Estimado R\$ 150,00 hora/técnica	R\$ 20.000,00
Imprevistos	Estimado 1,5% do custo direto	R\$ 59.482,16
Subtotal		R\$ 585.684,64

A estimativa dos custos de implantação (CAPEX) para o sistema resultou em um investimento total de R\$ 4.551.161,74, valor que engloba tanto os custos diretos (R\$ 3.965.477,10) quanto os custos indiretos (R\$ 585.684,64). Observa-se que aproximadamente 87% do investimento corresponde aos custos diretos, evidenciando que a maior parcela dos recursos financeiros está associada à aquisição dos equipamentos e à infraestrutura necessária para a implantação do sistema.

Entre os custos diretos, destacam-se as membranas de NF, responsáveis por cerca de 25% do CAPEX direto, seguidas pela montagem eletromecânica, obras civis, instalação hidráulica, painéis elétricos e bombas de alta pressão. Esse comportamento está de acordo com a literatura (ABDEL-FATAH, 2018; ELBOUGHDIRI, et al, 2024), que aponta os módulos de membranas e os equipamentos associados ao bombeamento como os principais componentes do investimento inicial em sistemas de separação por membranas. Além disso, os custos indiretos permaneceram inferiores a 15% do investimento total, refletindo a adoção de critérios de rateio compatíveis com empreendimentos de saneamento e instalações industriais (BRASIL, 2013).

3.2. Estimativa do OPEX

A despesa operacional aqui foi dividida em custos de operação e manutenção, a Tabela 4 apresenta os custos de operação que compõe o OPEX do sistema na ETE.

Tabela 4: Custos operacionais relacionados ao sistema.

Item	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Energia elétrica	3.595.104,00	R\$ 1,10	R\$ 3.954.614,40
Substituição das membranas	88	R\$ 4.350,00	R\$ 380.785,64
Produtos químicos:			
Ácido	20	R\$ 223,00	R\$ 4.460,00
Base	20	R\$ 212,25	R\$ 4.245,00
Biocida	5	R\$ 42,45	R\$ 212,25
Antiincrustante	5	R\$ 44,37	R\$ 221,85

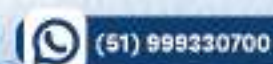
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



Mão de obra:			
Salário	4	R\$ 4.500,00	R\$ 18.000,00
Encargos	4	R\$ 3.800,00	R\$ 15.200,00
Subtotal			R\$ 4.377.739,14

Na Tabela 5 são mostrados os custos de manutenção que compõe o OPEX.

Tabela 5: Custos de manutenção relacionados ao sistema.

Item	Referência	Valor Total (R\$)
Manutenção preventiva	3,5% do capex	R\$ 159.290,66
Manutenção corretiva	2,0% do capex	R\$ 91.023,23
Manutenção instrumentação	0,5% do capex	R\$ 22.755,81
Peças de reposição	1,5% do capex	R\$ 68.267,43
Subtotal		R\$ 341.337,13

A análise dos custos operacionais demonstra que o OPEX anual foi estimado em R\$ 4.719.076,27, sendo fortemente influenciado pelo consumo de energia elétrica. Apenas esse item representa aproximadamente 84% do custo operacional total, evidenciando que a demanda energética constitui o principal fator econômico limitante para a operação de sistemas de NF. Esse resultado era esperado, uma vez que a tecnologia opera sob pressões relativamente elevadas, exigindo bombeamento contínuo durante toda a operação.

Em contrapartida, os custos relacionados aos produtos químicos utilizados na limpeza química das membranas (CIP), bem como aqueles referentes à mão de obra operacional, apresentaram participação reduzida no custo operacional global. Da mesma forma, embora a substituição periódica das membranas represente um componente relevante do OPEX, seu impacto financeiro permanece significativamente inferior ao custo associado ao consumo de energia elétrica. Esse comportamento reforça que estratégias voltadas à redução da pressão de operação, otimização do fluxo de permeado, aumento da recuperação hidráulica e utilização de equipamentos de maior eficiência energética tendem a produzir reduções mais expressivas no custo operacional do sistema do que intervenções relacionadas aos insumos químicos.

3.3. Indicadores de performance econômica

Tendo os resultados de CAPEX e OPEX estimados para o sistema terciário/quaternário da ETE, foram sugeridos indicadores (Tabela 6), de forma a subsidiar a viabilidade do projeto.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores

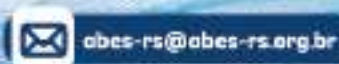
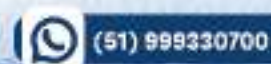


Tabela 6: Indicadores sugeridos para avaliação econômica do sistema.

Nº	INDICADOR	RESULTADO	DESCRIÇÃO
1	Custo Unitário de Tratamento (R\$/m³)	R\$ 2,49	Custo para tratar 1 m³ de efluente pelo sistema
2	Fator de Recuperação de Capital (<i>Capital Recovery Factor - CRF</i>)	0,19	Fator de recuperação do CAPEX por ano
3	Custo Total Anualizado (R\$/ano)	R\$ 5.600.670,54	Custo total do tratamento de efluente, considerando o CAPEX/ano

$$Custo \left(\frac{R\$}{m^3} \right) = \frac{OPEX}{Q_{anual}} \quad (1)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

$$Custo_{anualizado} \left(\frac{R\$}{ano} \right) = (CAPEX * CRF) + OPEX \quad (3)$$

Considerando:

CRF: fator de recuperação de capital (adimensional)

i = taxa de juros anual (decimal)

n = vida útil do sistema (anos)

Considerando a vazão anual tratada, foi obtido um custo unitário de tratamento de aproximadamente R\$ 2,49/m³, valor que demonstra que, apesar do elevado consumo energético característico da NF, o custo específico permanece relativamente competitivo quando analisado sob a ótica de sistemas avançados destinados ao polimento de efluentes e à produção de água para reúso. Deve-se ressaltar que esse valor representa exclusivamente o custo adicional correspondente à etapa terciária/quaternária, não contemplando os custos já existentes do tratamento convencional da estação.

A anualização do investimento inicial, utilizando um CRF igual a 0,19, resultou em um custo total anualizado de R\$ 5.600.670,54, incorporando simultaneamente os custos de capital e os custos anuais de operação e manutenção. Esse indicador fornece uma representação mais realista do custo efetivo da tecnologia ao longo de sua vida útil, permitindo comparações entre diferentes alternativas de tratamento que apresentam distintas relações entre investimento inicial e despesas operacionais.

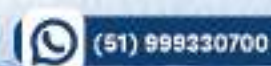
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



Entretanto, a interpretação da viabilidade econômica deve considerar uma importante limitação deste estudo. Os indicadores financeiros tradicionalmente empregados em análises de investimento, como TIR, valor presente líquido (VPL) e *payback*, não foram determinados, uma vez que a implantação do sistema não gera, no cenário atualmente considerado, receitas financeiras diretamente mensuráveis. Os principais benefícios decorrentes da adoção da NF apresentam natureza predominantemente ambiental e social, incluindo a remoção de nutrientes e CPEs, a melhoria da qualidade do corpo hídrico receptor, o atendimento às condicionantes ambientais e a redução dos riscos associados à presença de micropoluentes nos recursos hídricos. Embora esses benefícios possuam elevado valor para a sociedade, sua monetização depende da aplicação de metodologias específicas de valoração ambiental, não contempladas nesta pesquisa.

3.4. Benefícios indiretos da implantação do sistema

Embora a avaliação econômica realizada neste estudo tenha contemplado apenas os custos de investimento (CAPEX) e operação (OPEX), a implantação da NF na ETE proporciona benefícios ambientais, sociais e operacionais que não foram monetizados, mas que devem ser considerados na análise global da viabilidade da tecnologia.

A Tabela 7 apresenta os principais benefícios possíveis a partir da implantação do sistema terciário/quaternário na ETE.

Tabela 7: Benefícios indiretos da implantação do sistema.

Benefício	Impacto esperado	Mensuração econômica
Melhoria da qualidade do efluente	Redução da carga poluidora lançada no corpo hídrico receptor	Não monetizado
Remoção de nutrientes	Atendimento às exigências ambientais e melhoria do desempenho da ETE	Não monetizado
Saúde pública	Melhoria das condições ambientais e da qualidade de vida da população do entorno	Não monetizado
Reúso de água	Potencial substituição de água potável em serviços operacionais da empresa e futuras aplicações agrícolas	Potencialmente monetizável em estudos futuros
Sustentabilidade institucional	Maior conformidade regulatória, fortalecimento da imagem institucional e redução do risco de autuações	Não monetizado

3.4.1 MELHORIA DA QUALIDADE DO EFLUENTE E PROTEÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A implantação da NF como etapa terciária/quaternária promove significativa melhoria da qualidade do efluente final, reduzindo a concentração de matéria orgânica residual, sólidos dissolvidos, fósforo, sais e outros contaminantes presentes após o tratamento biológico convencional.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Essa melhoria representa um benefício ambiental relevante para o arroio, corpo receptor direto do efluente tratado, cuja foz ocorre aproximadamente 500 m a jusante no Rio dos Sinos. Dessa forma, a redução da carga poluidora lançada contribui não apenas para a recuperação da qualidade ambiental do arroio, mas também para a preservação de um dos principais cursos d'água da região, minimizando os impactos cumulativos sobre a bacia hidrográfica.

3.4.2 BENEFÍCIOS À SAÚDE PÚBLICA E À QUALIDADE DE VIDA

A melhoria da qualidade do efluente tende a reduzir os impactos ambientais atualmente observados no corpo hídrico receptor, especialmente aqueles associados à degradação da qualidade da água e à geração de odores e proliferação de microrganismos.

Embora esses benefícios não tenham sido quantificados economicamente, espera-se que contribuam para melhores condições sanitárias e ambientais para a população residente no bairro e em áreas adjacentes, refletindo positivamente na qualidade de vida da comunidade.

3.4.3 ATENDIMENTO ÀS EXIGÊNCIAS DOS ÓRGÃOS AMBIENTAIS

Outro benefício importante refere-se ao aumento da eficiência na remoção de fósforo. Esse aspecto assume especial relevância considerando que o sistema terciário originalmente previsto para a ETE não apresentou desempenho satisfatório ao longo da operação da estação, constituindo uma demanda recorrente apontada pelos órgãos de fiscalização ambiental, entre eles a AGESAN-RS, a FEPAM e o Ministério Público do Estado do Rio Grande do Sul. Assim, a implantação da NF poderá contribuir para o atendimento das condicionantes ambientais e para a redução do risco de futuras sanções administrativas e judiciais relacionadas ao lançamento de fósforo no corpo receptor.

3.4.4 POTENCIAL PARA REÚSO DE ÁGUA

Resultados parciais experimentais obtidos na unidade piloto indicaram que o permeado produzido atende aos parâmetros de qualidade estabelecidos pela legislação estadual para determinadas modalidades de reúso agrícola.

Embora a implantação de um programa de reúso exija estudos complementares de viabilidade técnica, econômica, operacional e sanitária, os resultados obtidos demonstram o potencial da tecnologia para ampliar a segurança hídrica do município.

Além das possibilidades de reúso agrícola, destaca-se uma aplicação imediata no âmbito da própria Autarquia, mediante substituição parcial da água potável atualmente utilizada em atividades como limpeza urbana, lavagem de vias públicas e desobstrução de redes coletoras de esgoto. Atualmente essas atividades são realizadas com caminhões próprios e terceirizados abastecidos com água potável, o que representa um uso de água de qualidade superior à efetivamente necessária para essas finalidades.

A utilização do permeado produzido pela NF nessas atividades poderá reduzir o consumo de água potável, contribuindo para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos e alinhando o empreendimento aos princípios da economia circular e do reúso planejado da água.

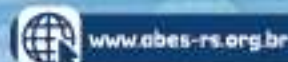
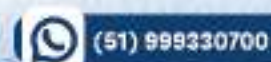
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



3.4.5 CONTRIBUIÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE DA ETE

Além dos aspectos econômicos avaliados, a implantação do sistema amplia o desempenho ambiental da ETE ao incorporar uma etapa avançada de tratamento capaz de produzir um efluente de maior qualidade, possibilitando futuras estratégias de reúso e aumentando a segurança ambiental do lançamento final.

Sob essa perspectiva, os benefícios decorrentes da implantação extrapolam os indicadores financeiros tradicionais, incorporando ganhos ambientais, sociais e institucionais que, embora de difícil quantificação monetária, constituem elementos relevantes para a tomada de decisão em empreendimentos de saneamento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstram que a implantação de um sistema terciário/quaternário na ETE é tecnicamente exequível e apresenta custos compatíveis com tecnologias avançadas destinadas à produção de água de reúso e à remoção de nutrientes e CPEs. Embora o consumo de energia elétrica represente o principal componente do custo operacional, os indicadores obtidos fornecem uma base consistente para o planejamento de investimentos em processos avançados de tratamento, especialmente diante do crescente rigor das legislações ambientais e da necessidade de ampliação da segurança hídrica.

Sob a perspectiva econômica, a viabilidade da tecnologia não deve ser analisada exclusivamente pelos custos de implantação e operação, mas também pelos benefícios ambientais, sociais e estratégicos decorrentes de sua adoção. À medida que o efluente tratado passe a ser efetivamente reutilizado em aplicações urbanas, industriais ou agrícolas, será possível incorporar receitas e economias decorrentes da substituição da água potável, permitindo a determinação de indicadores como VPL, TIR e *payback*. Nesse contexto, a NF deixa de representar apenas uma tecnologia de tratamento de efluentes e passa a constituir um instrumento para a promoção da economia circular, da segurança hídrica e da gestão sustentável dos recursos hídricos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento desta pesquisa, por meio do Edital FAPERGS nº 02/2022 – Inova Clusters Tecnológicos, cujo fomento foi fundamental para a execução das atividades experimentais e para o desenvolvimento dos resultados apresentados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABDEL-FATAH, M. A. Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article. *Ain Shams Engineering Journal*, [S. l.], v. 9, p. 3077-3092, 2018.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

BFDIAS. **Membranas de osmose reversa: tipos, diferenças e vida útil.** Disponível em: <https://bfdias.com.br/blog/membranas-osmose-reversa-tipos-vida-util/>. Acesso em 26/06/2026.

BNDES. **Taxa de Longo Prazo – TLP.** Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/tlp-taxa-de-longo-prazo>. Acesso em 30/06/2026.

BRASIL. Tribunal de Contas da União (Plenário). **Acórdão nº 2622/2013.** Relator: Ministro-Substituto Marcos Bemquerer Costa. Data da sessão: 25 de setembro de 2013. In: Relatório e Voto. Brasília, DF, 2013.

BRASIL. **Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021.** Estabelece normas gerais de licitação e contratação para as Administrações Públicas diretas, autárquicas e fundacionais da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios. Brasília, DF: Presidência da República, 2021.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **SINAPI: Referências para Custos Horários e Encargos: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil / Caixa Econômica Federal.** – 8ª Ed. – Brasília: CAIXA, 2026.

DANFOSS. **High-pressure pumps for reverse osmosis applications.** Disponível em: <https://www.danfoss.com/en/products/hpp/pumps/high-pressure-pumps-for-reverse-osmosis-applications/#tab-overview>. Acesso em 26/06/2026.

ELBOUGHDIRI, N., Cosma, R., Amari, A. et al. Evaluating the feasibility of direct contact membrane distillation and nanofiltration in ground water treatment through a techno-economic analysis. **Appl Water Sci**, 14, 130, 2024.

IBGE. **Inflação.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>. Acesso em 30/06/2026.

PROTONS. **Membrana de osmose reversa: Qual a vida útil e quando é hora de substituí-las?** Disponível em: <https://protonsbrasil.com.br/blog/membrana-de-osmose-reversa/>. Acesso em 26/06/2026.

PUREAQUA. **Nanofiltration Systems.** Disponível em: <https://pureaqua.com/industrial-nanofiltration-nf-systems/>. Acesso em 26/06/2026.

RASHID, Siti Safirah; LIU, Yong-Qiang. Assessing environmental impacts of large centralized wastewater treatment plants with combined or separate sewer systems in dry/wet seasons by using LCA. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 27, n. 13, p. 15674–15690, 2020.

ROHREPUMPS. **What Pumps Are Used in an RO System? And How Long Do They Last?** Disponível em: <https://rohrepumps.com/what-pumps-are-used-in-an-ro-system-and-how-long-do-they-last/>. Acesso em 26/06/2026.

ROTAINOX. **Osmose Reversa para Tratamento do Permeado de Nanofiltração e Ultrafiltração.** Disponível em: <https://rotainox.com.br/equipamento/osmose-reversa-para-permeados-de-nanofiltracao-e-ultrafiltracao>. Acesso em 26/06/2026.

VAN ASSEL, Johan; KROLL, Stefan; DELGADO, Rosalia. Calculation of Dry Weather Flows in Pumping Stations to Identify Inflow and Infiltration in Urban Drainage Systems. **Water**, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 864, 2023.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br