

II-274 - ESTIMATIVA PRELIMINAR DE CUSTOS DO PROCESSO DE NANOFILTRAÇÃO NO TRATAMENTO DE LIXIVIADO DO ATERRO SANITÁRIO DE SEROPÉDICA (RJ)

Ronei de Almeida⁽¹⁾

M.Sc em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos – Tecnologia Ambiental – EPQB/EQ/UFRJ. Engenheiro Químico/UFRJ. Doutorando em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos (EPQB/EQ/UFRJ).

Fábio de Almeida Oroski

D.Sc em Engenharia Química – Gestão e Inovação Tecnológica – TPQB/EQ/UFRJ. Engenheiro Químico/UFRJ. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Química da Escola de Química/UFRJ.

Juacyara Carbonelli Campos

D.Sc. em Engenheira Química – Tecnologia Ambiental – PEQ/COPPE/UFRJ. Engenharia Química/UFRJ. Professora Associada do Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química /UFRJ.

Endereço⁽¹⁾: Av. Athos da Silveira Ramos nº 149, Bloco E, sala E 206 – Centro de Tecnologia – Cidade Universitária – Ilha do Fundão – Rio de Janeiro – RJ – CEP:21941-909 e-mail: ronei@eq.ufrj.br.

RESUMO

Um dos principais problemas relacionados ao gerenciamento dos resíduos sólidos é o efetivo tratamento dos líquidos lixiviados gerados em aterros sanitários, visto que, até o momento, não foram desenvolvidas soluções que tragam resultados econômicos mais satisfatórios no tratamento desse efluente. Observa-se que os insucessos obtidos no Brasil relacionados ao tratamento do lixiviado, apontam para necessidade de se reexaminar as estratégias adotadas, no qual as preocupações fundamentais, não só estejam associadas à eficiência do tratamento, como também aos custos do processo. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo realizar a estimativa de custos de investimento, manutenção e operação do processo de nanofiltração para tratamento do lixiviado previamente tratado por processo físico-químico proveniente do aterro sanitário de Seropédica (RJ). A estimativa de custos foi realizada com base nos resultados obtidos nos testes em unidade de filtração em laboratório e extrapoladas para um sistema real com vazão de tratamento de lixiviado pré definida, sendo representada, neste trabalho, pelos custos de capital (CAPEX), pelos custos de operação (OPEX) e pelo custo total (CT), e normalizada por unidade de volume de lixiviado tratado. observou-se que para um período de operação de 15 anos do processo de nanofiltração para tratamento de lixiviado previamente tratado por processo físico-químico, o custo total será de R\$ 35,47 por m³ de efluente tratado, considerando o custo da membrana polimérica de R\$ 156,00.m⁻² e de R\$ 39,19.m⁻³ de efluente tratado, considerando o custo da membrana de R\$ 702,00.m². Ademais, o custo de tratamento do m³ de lixiviado decresce quanto maior o período de funcionamento do sistema. Considerando que o aterro sanitário operaria por 25 anos e após o encerramento das atividades, a estação de tratamento de lixiviado manteria suas atividades por mais 15 anos, em um período de 40 anos, o custo total para tratar o m³ de lixiviado por nanofiltração seria de R\$ 30,70 e R\$ 33,79. Ademais, parte-se do pressuposto que mediante a utilização do processo de nanofiltração, seria possível abdicar dos processos biológicos atualmente empregados na estação, visto que a avaliação deste estudo foi apartir de um efluente pré-tratado apenas por processo físico-químico.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro sanitário, lixiviado, nanofiltração, custos de capital (OPEX), custos de operação (OPEX), custo total (CT), análise econômica.

INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas relacionados ao gerenciamento dos resíduos sólidos é o efetivo tratamento dos líquidos lixiviados gerados em aterros sanitários, visto que, até o momento, não foram desenvolvidas soluções que tragam resultados econômicos mais satisfatórios no tratamento desse efluente.

De acordo com a literatura revisada, nos últimos anos, devido os padrões de descarte de efluentes líquidos cada vez mais restritivos, tratamentos mais eficientes baseados em processos de separação por membranas (PSM),

principalmente, nanofiltração e osmose inversa, têm sido utilizados como rota tecnológica para polimento do lixiviado tratado previamente por processos biológicos e/ou físico-químicos ou substituindo, completamente, os processos convencionais de tratamento (DE ALMEIDA et al., 2017; GIORDANO et al., 2002; MARIAN e NGHIEM, 2010; MARTTINEN et al., 2002; YAO, 2013).

Segundo Moravia (2010), os PSM nas últimas décadas tiveram destaque, principalmente nos países europeus, onde Gierlich e Kolbach (1998), mencionavam esta tecnologia no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Vickers (2005) apontou o crescimento significativo da aplicação dos PSM a partir da década de 1990 em termos de utilização e número de instalações. De acordo com o autor, o crescimento acentuado observado nessa década, estava relacionado com os custos de implantação mais competitivos (em comparação aos tratamentos convencionais), em função da economia de escala e de inovações implementadas nos PSM (VICKERS, 2005). Ademais, ressalta-se que, é estimado que o mercado de membranas apresentará uma taxa de crescimento de 10% de 2016 a 2021 (INDUSTRY ARC, 2017).

Observa-se que os insucessos obtidos no Brasil relacionados ao tratamento do lixiviado, apontam para necessidade de se reexaminar as estratégias adotadas, no qual as preocupações fundamentais, não só estejam associadas à eficiência do tratamento, como também aos custos do processo.

Segundo Seider et al. (2004), o custo total de um projeto é dado pelo somatório dos custos de capital (CAPEX), do inglês, *Capital Expenditure*, definido como montante de investimentos realizados em equipamentos e instalações de forma a manter a produção de um produto, realização de um serviço ou manter em funcionamento um negócio ou um determinado sistema, somado aos custos de operação (OPEX), do inglês *Operational Expenditure*, referentes aos custos associados a manutenção dos equipamentos e aos gastos de consumíveis e outras despesas operacionais, tais como mão-de-obra e manutenção, necessários à operação dos sistemas. Ressalta-se que o CAPEX e o OPEX têm diferentes impactos em projetos, pois a maior parte das despesas de capital é fixa e seu impacto financeiro em um projeto é sentido imediatamente. De forma análoga, os custos operacionais são incorridos ao longo de toda a vida do projeto e incluem um componente variável que pode ser gerenciado continuamente (SEIDER et al., 2004).

A acurácia de uma estimativa de custos de um projeto depende do seu nível de detalhamento, dos dados disponíveis e do tempo empregado para realização do estudo. Nos estágios iniciais, essa estimativa é apenas uma aproximação dos custos, necessária para o levantamento dos dados de forma mais precisa em etapas posteriores (SEIDER et al., 2004). Perlingeiro (2004) apontou que existem diversos critérios de avaliação econômica e estimativas de custos descritos na literatura especializada e praticados nas empresas, e que são utilizados diferentemente de acordo com as circunstâncias e necessidades.

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo realizar a estimativa de custos de investimento, manutenção e operação do processo de nanofiltração para tratamento do lixiviado previamente tratado por processo físico-químico proveniente do aterro sanitário de Seropédica (RJ).

MATERIAIS E MÉTODOS

A estimativa de custos foi realizada com base nos resultados obtidos nos testes em unidade de filtração em laboratório e extrapoladas para um sistema real com vazão de tratamento de lixiviado pré-definida, sendo representada, neste trabalho, pelos custos de capital (CAPEX), pelos custos de operação (OPEX) e pelo custo total (CT), e normalizada por unidade de volume de lixiviado tratado.

Para estimativa preliminar de custos do processo de nanofiltração, foram feitas as seguintes considerações:

- A estação de tratamento de lixiviado operaria 365 dias por ano e ficaria fora de operação somente nos períodos de manutenção de rotina, limpeza química e teste de integridade (GUERRA e PELLEGRINO, 2012);
- A planta do processo de nanofiltração operaria com eficiência de 60% (AMARAL et al., 2016);
- Os módulos de membrana utilizados teriam 1,016 m de comprimento, 0,2 m de diâmetro e 40 m² de área útil (BAKER, 2004);

- O levantamento do custo preliminar do processo foi realizado considerando o custo do metro quadrado da membrana polimérica de R\$156,00 (GUERRA e PELLEGRINO, 2012; BAKER, 2004) e US\$ 180. m⁻² apontado por Amaral et al. (2016) para membrana de nanofiltração NF90-2540, Dow-Filmtec, Minneapolis, EUA.

- A taxa de câmbio considerada na conversão de valores de US\$ para R\$ foi de R\$ 3,90/US\$ (referente ao dia 13/08/2018) (BCB, 2018).

O CAPEX foi determinado somando-se os custos de aquisição dos módulos de membranas, de vasos (*housings*), de válvulas, de tubulações e de instrumentações que constituem uma unidade de permeação (SINGH e CHERYAN, 1998; SALEHI et al., 2014).

Para a composição do OPEX, foram elencados os custos do consumo energético para operação do sistema de nanofiltração, da depreciação do investimento, da troca de membranas, da manutenção, da mão-de-obra e da regeneração das membranas (SINGH e CHERYAN, 1998).

O custo total (CT) por unidade de volume de lixiviado tratado foi obtido pela Equação 1, que contabiliza o custo operacional (OPEX) normalizado por volume anual de efluente tratado e o custo de capital (CAPEX) normalizado por volume de efluente tratado anualmente somado ao tempo, em anos, de operação do processo de nanofiltração, determinada por meio da Equação 2.

$$CT = R_{CAPEX} + \frac{OPEX}{V_T} \quad (1)$$

$$R_{CAPEX} = \frac{CAPEX}{V_T \times n} \quad (2)$$

Onde,

R_{CAPEX}: custo de capital normalizado por volume de efluente tratado (R\$.m³); n : período de operação da estação de tratamento de lixiviado considerado em anos; V_T : volume total de efluente tratado (m³.ano⁻¹)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros operacionais e as variáveis de projeto calculadas inicialmente.

Tabela 1. Parâmetros operacionais e variáveis de projeto.

Cálculo da vazão de alimentação do PSM			
Eficiência		%	60
Vazão de alimentação		L.h ⁻¹	32534
Cálculo da vazão efetiva de permeado do PSM			
Tempo de manutenção de rotina (a)	t _{mr}	min.dia ⁻¹	10
Tempo de testes de integridade (a)	t _{ti}	min.dia ⁻¹	20
Tempo anual de limpezas químicas (a)	t _{lq}	h.ano ⁻¹	300
Tempo diário de limpezas químicas		min.dia ⁻¹	49,3151
Tempo total sem produção de permeado	t _{inop}	min.dia ⁻¹	79,3151
Razão de tempo operacional	R _{op}		0,9449
Vazão efetiva de permeado	Q _e	L.h ⁻¹	34430,4
Fluxo de permeado	J	L.m ⁻² .h ⁻¹	12,0
Área de membrana	A _m	m ²	2869,2
Cálculo da vazão de recirculação do PSM			
Vazão de recirculação experimental	Q _{exp}	L.h ⁻¹	30
Área transversal do módulo experimental	A _{te}	m ²	0,0000291
Velocidade de escoamento tangencial	VET	m.s ⁻¹	0,2864
Medida do espaçador entre as membranas	L _{esp}	m	0,0006
Comprimento do módulo de membranas (b)	L _{mm}	m	1,06
Comprimento da membrana enrolada no módulo espiral	L _{en}	m	2706,7944
Área transversal do módulo de membranas	A _{tp}	m ²	1,6240766
Vazão de recirculação	Q _r	L.h ⁻¹	1674305,8
Número de módulos de membranas			
Fluxo de permeado	J	L.m ⁻² .h ⁻¹	12,0
Área de membrana	A _m	m ²	2869,2
Área de um módulo de membrana (b)		m ²	40
Número de módulos de membranas			72

(a) GUERRA E PELLEGRINO (2012)

(b) BAKER (2004)

O cálculo da variável vazão de recirculação (Q_r) de projeto da bomba igual a 7372 gpm, indicou através de consulta ao Relatório de Estimativa de Custo para Equipamentos de Processo de Loh et al. (2002), a necessidade de mais de uma bomba para operação do sistema de nanofiltração. Desta forma, foi considerado o custo unitário de uma bomba com capacidade de 750 gpm (US\$ 11.600,00), obteve-se o número total de bombas necessárias para operação dos sistemas, corrigido pelas informações referenciadas no *Chemical Engineering Plant Cost Index*, de modo a representar dados atualizados para 2018, obtendo-se assim, o custo total das bombas de recirculação do projeto.

O cálculo das variáveis de projeto apontaram que para a operação do processo de nanofiltração, seriam necessários uma área de membrana de 2869, 2 m² dispostas em 72 módulos do tipo espiral com 1,06 m de comprimento, 0,2 m de diâmetro e 40 m² de área útil de membrana. Segundo comunicação pessoal (2017), a estação de tratamento de lixiviado do aterro sanitário de Seropédica (RJ), na sua configuração de tratamento atual, opera com 12 módulos de membranas tipo espiral, entretanto, não foram fornecidos dados de área de membrana e comprimento dos módulos.

O custo de capital do processo de nanofiltração na configuração proposta neste estudo foi de R\$ 19.557.499,08 considerando-se o custo da membrana polimérica de R\$ 156,00.m⁻² apresentado por Baker (2004); Guerra e

Pellegrino (2012), e de R\$ 22.173.694,90 no cenário em que o custo do m^2 de membrana foi de R\$ 702,00, assim como apontado por Amaral et al. (2016).

Em relação ao custo operacional obteve-se valor de R\$ 27,84 por m^3 de lixiviado tratado, considerando-se o custo da membrana polimérica de R\$ 156,00. m^{-2} apresentado por Baker (2004); Guerra e Pellegrino (2012) e R\$ 30,54. m^{-2} , quando o custo da membrana foi de R\$ 702,00, reportado por Amaral et al., 2016.

Destaca-se que as despesas operacionais são incorridas ao longo de toda a vida do projeto e incluem um componente variável que pode ser gerenciado continuamente, desta forma, evidencia-se que, boas práticas operacionais ao longo da vida útil da planta de tratamento de lixiviado, tais como, limpeza periódica das membranas, poderão reduzir os custos operacionais e tornar o processo de tratamento proposto mais atrativo do ponto de vista econômico.

A análise preliminar de custos do processo de tratamento do lixiviado proposto neste trabalho foi realizada através dos custos de capital (CAPEX), custos de operação (OPEX) e custo total (CT). Na Figura 1 são apresentados os valores de custo total por m^3 de efluente tratado, para diferentes períodos de funcionamento do processo de tratamento de lixiviado por nanofiltração.

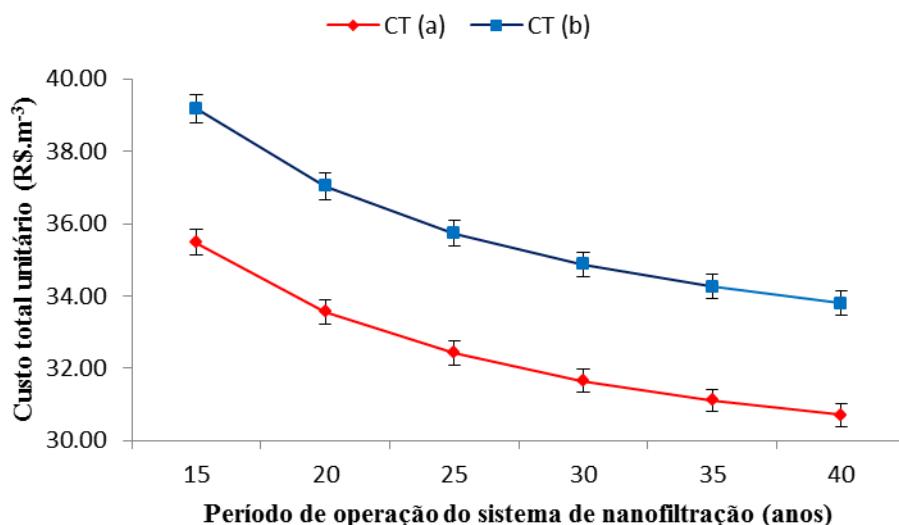


Figura 1. Custo total por m^3 de lixiviado tratado para diferentes períodos de funcionamento do processo de nanofiltração.

(a) GUERRA E PELLEGRINO (2012)
(b) BAKER (2004)

Conforme apresentado na Tabela 2, observou-se que para um período de operação de 15 anos do processo de nanofiltração para tratamento de lixiviado previamente tratado por processo físico-químico, o custo total será de R\$ 35,47 por m^3 de efluente tratado, considerando o custo da membrana polimérica de R\$ 156,00. m^{-2} e de R\$ 39,19. m^{-2} de efluente tratado, considerando o custo da membrana de R\$ 702,00. m^{-2} . Ademais, o custo de tratamento do m^3 de lixiviado decresce quanto maior o período de funcionamento do sistema. Considerando que o aterro sanitário operaria por 25 anos e após o encerramento das atividades, a estação de tratamento de lixiviado manteria suas atividades por mais 15 anos, em um período de 40 anos, o custo total para tratar o m^3 de lixiviado pré-tratado seria de R\$ 30,70 e R\$ 33,79.

Destaca-se que, no estudo apresentado neste documento, o tratamento proposto não apresenta quaisquer processos biológicos, o que além de elevar os custos de tratamento do lixiviado, mostra-se ineficiente no tratamento de efluentes com elevada concentração de matéria orgânica recalcitrante como o lixiviado de aterro sanitário (KARGI e PAMUKOGLU, 2003; VILAR et al., 2011). Adicionalmente, os processos de separação por membranas (PSM) atendem uma demanda crescente da área de tratamento de efluentes líquidos – estações de tratamento descentralizadas – ou seja, os custos com terrenos e construção são reduzidos, visto que os PSM

são sistemas compactos e podem ser dispostos em estruturas móveis, representando uma redução nos custos de capital do processo.

CONCLUSÕES

Neste estudo, as informações obtidas nas unidades experimentais foram utilizadas para realização de um levantamento inicial das variáveis de projeto e posterior apreciação dos custos de tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Seropédica (RJ) por nanofiltração.

Constatou-se que através do processo de nanofiltração avaliado neste estudo foi possível obter um lixiviado tratado a um custo inferior ao apresentado atualmente pela estação de tratamento do aterro sanitário de Seropédica (RJ), além disso, parte-se do pressuposto que mediante a utilização do processo de nanofiltração, seria possível abdicar dos processos biológicos atualmente empregados na estação, visto que a avaliação deste estudo foi apartir de um efluente pré-tratado apenas por processo físico-químico.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a elaboração de um estudo detalhado dos parâmetros operacionais e variáveis de projeto do processo de nanofiltração e, realização de orçamentos junto a fornecedores para uma avaliação econômica mais assertiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMARAL, M. C. S., MORAVIA, W. G., LANGE, L. C., ZICO, M. R., MAGALHÃES, N. C., RICCI, B. C., REIS, B. G. Pilot aerobic membrane bioreactor and nanofiltration for municipal landfill leachate treatment. *Journal of Environmental Science and Health, Part A, Toxic Hazardous Substances and Environmental Engineering*, v. 1, p. 1-10, 2016.
2. BAKER, R.W. *Membrane Technology and Applications*. 2 ed. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2004. 534 p.
3. BCB, 2018. Banco Central do Brasil. Taxas de Câmbio. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?id=txcotacao>>. Acesso em: 13 ago. 2018.
4. DE ALMEIDA, R., OROSKI, F. A., CAMPOS, J. C. Treatment of landfill leachate by a combined process of coagulation-flocculation and nanofiltration. In: *Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Paula, Cagliari, Italy, 2017.
5. GIORDANO, G., FERREIRA, J. A., PIRES, J. C. A., RITTER, E., CAMPOS, J. C., ROSSO, T. C. A. Tratamento do Chorume do Aterro Metropolitano de Gramacho, Rio de Janeiro, Brasil. In: *XXVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental*. Cancun, México. 2002.
6. GUERRA, K., PELLEGRINO, J. Investigation of Low-Pressure Membrane Performance, Cleaning, and Economics Using a Techno-Economic Modeling Approach. U.S. Department of Interior, p.127, 2012.
7. HABERT, A.C., BORGES, C.P., NOBREGA, R. *Processos de Separação por Membranas*. 1 ed. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda, 2006. 180 p.
8. INDUSTRY ARC. RO and UF Membranes Market: By Application (Drinking Water, Cell Separation, Virus Removal, Food & Beverage and Others); By Composition (Cellulose Acetate, Polyamide); By Type (Asymmetric, Liquid, Solution Coated) and By Geography-Forecast (2017-2022). Report Code 0006. Industry Analytics, Research, Consulting. 2017.
9. LOH, H. P., LYONS, J., WHITE, C. W. Process Equipment Cost Estimation by Aspen Icarus. National Energy Technology Centre (DOE/NETL), 2002.
10. KARGI, F., PAMUKOGLU, M. Y. Aerobic biological treatment of pre-treated landfill leachate by fed-batch operation. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 33, n. 5, p. 588-595, 2003.
11. MARIAM, T., NGHIEM, L. D. Landfill leachate treatment using hybrid coagulation-nanofiltration processes. *Desalination*, v. 250, p. 677-682. 2010.
12. MARTTINEN, S. K., KETTUNEN, R. H., RINTALA, J. A. Occurrence and removal of organic pollutants in sewages and landfill leachates. *The Science of the Total Environmental*, v. 301, p. 1-12, 2002.
13. MORAVIA, W. G. *Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas*. Tese (Doutorado). 2010. 261 f. Programa de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2010.

14. VILAR, V. J., ROCHA, E. M., MOTA F. S., FONSECA, A., SARAIVA, I., BOAVENTURA, R. A. Treatment of a sanitary landfill leachate using combined solar photo-Fenton and biological immobilized biomass reactor at a pilot scale. *Water Research*, v. 45, n. 8, p. 2647–2658, 2011.
15. PERLINGEIRO, C. A. G. *Engenharia de processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos*. 1 ed. São Paulo: Bluncher, 2005. 198 p.
16. SALEHI, E., MADAENI, S. S., SHAMSABADI, A. A., LAKI, S. Applicability of ceramic membrane filters in pretreatment of coke-contaminated petrochemical wastewater: Economic feasibility study. *Ceramics International*, v.40, p. 4805-4810, 2014.
17. SEIDER, W., SEADER, J. D., LEWIN, D. R. *Product and process design principles*, J. Wiley, 2004. 768 p.
18. SINGH, N., CHERYAN, M. Process Design and Economic Analysis of a Ceramic Membrane System for Microfiltration of Corn Starch Hydrolysate. *Journal of Food Engineering*, v. 38, p. 57-67, 1998.
19. VICKERS, J. C. Introduction. In: AWWA. *Microfiltration and Ultrafiltration Membranes for Drinking Water*. 1st ed. American Water Works Association, p. 1-7, 2005.
20. YAO, P. Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arabian Journal of Chemistry*, p. 2-3, 2013.