

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MBBR ACOPLADO A FILTRO LENTO DE AREIA E A OSMOSE INVERSA PARA TRATAMENTO DE EFLUENTE DA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO VISANDO REUSO

Isabelli do Nascimento Dias¹ & Ana Cláudia Cerqueira²; Márcia Dezotti³

RESUMO – O aumento das refinarias de petróleo no Brasil, o volume de água utilizado e a preocupação ambiental, tem sido os motivos para se buscar práticas de reuso. O objetivo do trabalho foi avaliar o tratamento de efluente de uma refinaria, propondo uma nova combinação de processos: tratamento biológico (MBBR), seguido de filtro lento de areia (FLA) e osmose inversa, visando reuso. Avaliou-se o desempenho do MBBR em termos de remoção de matéria orgânica e nitrogenada e fenóis totais, sendo que a remoção para DQO foi 98%, amônia, 75% e 95% para fenóis, apresentando uma ótima eficiência. Após o MBBR, o efluente seguiu para um FLA operado com duas taxas e removeu entre 15 e 40% de DQO e 30 e 60% de NH_4^+ , além de microrganismos. Entretanto, para menores fluxos, o filtro apresentou maiores remoções de NH_4^+ e microrganismos, além de apresentar uma carreira de filtração maior. Após essa etapa, o efluente já estaria apto para reuso em torres de resfriamento, já para reuso em caldeira foi necessário o uso da OI para redução da condutividade e DQO. Para o uso da OI, realizou-se a análise do SDI, que apresentou valor dentro da faixa exigida para processo com membrana.

ABSTRACT – The increase of the refining of petroleum in Brazil, the volume of water used by this sector and the concern with water resources has been the motives for seeking practices of reuse, aiming adapting these industries with environmental regulation. The objective of this work was to evaluate a new combination of processes for treatment of effluent from an oil refinery: biological treatment (MBBR), followed by slow sand filter (SSF) and reverse osmosis in order to obtain water for reuse. MBBR removed 98% of COD, 75% of NH_4^+ and 95% of total phenols, After MBBR, the treated effluent followed to a SSF operated with two filtration rates and removed between 15 and 40% of COD and 30 and 60% of NH_4^+ . The removal of microorganisms was significant for both filtration rates. However, for smaller filtration rate, the filter showed higher removals of NH_4^+ and microorganisms and presented a greater career filtration. After this step, the effluent could be reused in cooling towers, but for reuse in the boiler it is necessary to use the RO process in order to reduce conductivity and COD. Analysis of SDI was equal to 5, being within the range required for process with membranes.

Palavras-Chave – Reuso; Efluentes da indústria do petróleo; Reator de leito móvel com biofilme.

¹Doutoranda do Programa de Engenharia Química/COPPE/UF RJ, POB 68502, 21941-972, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Tel: (21) 2562-8302, isabelli@peq.coppe.ufrj.br

²Engenheira Química da Petrobras, Cenpes, Av Horácio Macedo 950, Cidade Universitária, 21941-915, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Tel: (21) 3865-1375, Fax: (21) 3865-6973, ana.cerqueira@petrobras.com.br

³Professora do Programa de Engenharia Química/COPPE/UF RJ, POB 68502, 21941-972, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Tel: (21) 2562-8347, mdezotti@peq.coppe.ufrj.br

1. INTRODUÇÃO

Devido à eminente escassez, a água está se tornando um recurso valioso e limitador do desenvolvimento sustentável. Aliada a escassez de água, o crescimento da consciência ambiental e o alto custo do tratamento de efluentes, frente às conseqüências do descarte dos efluentes nos recursos naturais, fez com que as indústrias adotassem medidas para controlar essa situação.

O aumento da preocupação com a quantidade e qualidade dos recursos hídricos, juntamente com a perspectiva de aumento do parque de refino de petróleo no Brasil e o grande volume de água utilizado nesse setor, tem sido os motivos para se buscar práticas ambientais visando à adequação dessas indústrias com a regulação ambiental. Nesse cenário, o reuso é uma realidade, pois, além de reduzir os custos envolvidos, sendo economicamente vantajoso, reduz o volume de efluente descartado.

O uso da água em uma refinaria é intensivo e se dá, praticamente, em todo processo de refino do petróleo, principalmente nas unidades de geração de vapor e resfriamento de correntes. São utilizados em média 250 a 350 litros de água por barril processado, sendo que a maior parte da água consumida é descartada (Mariano, 2001).

A Figura 1 apresenta os principais usos da água em uma refinaria.

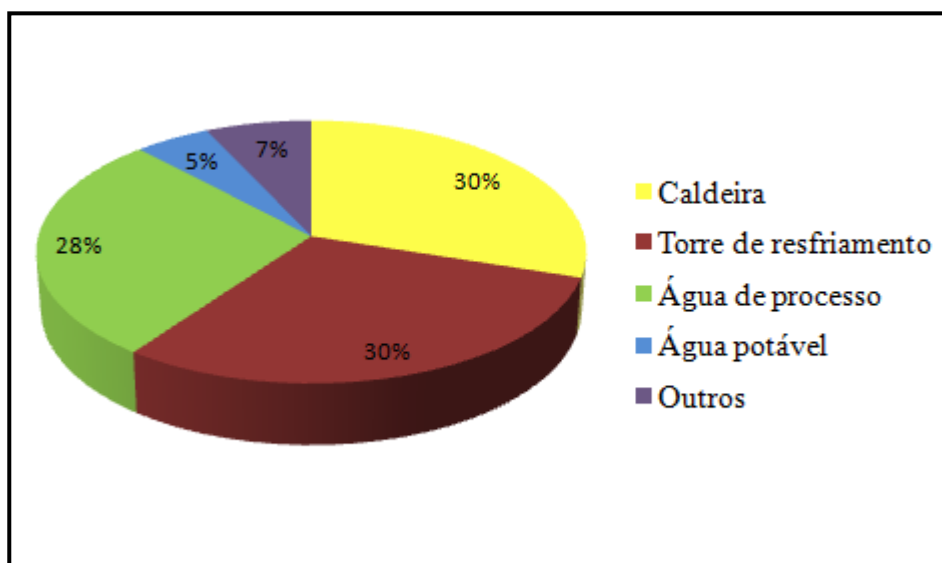


Figura 1 Consumo de água em uma refinaria (Adaptado de Monteiro, *et al.* 2004).

Para a realização do reuso em uma refinaria faz-se necessário a identificação dos locais onde há tal possibilidade, além de requerer uma caracterização da qualidade da água que sai do processo industrial e dos critérios de qualidade necessários para esse processo dentro da refinaria, ou seja, deve haver compatibilidade entre as características do efluente e as exigências para os diversos processos.

A remoção de matéria orgânica e salinidade são essenciais quando se deseja reusar a água em refinarias, principalmente em caldeiras. O processo de lodos ativados e suas variantes são considerados os mais eficientes para a remoção de compostos orgânicos, se destacando o processo MBBR, que congrega, em um único sistema, as melhores características do processo de lodo ativado e do processo com biofilmes, deixando de lado as características indesejáveis (Rusten *et al.*, 2006). Entretanto, esse processo necessita de tratamento complementar para desmineralização do efluente.

A utilização do processo de osmose inversa para o tratamento de água tem sido intensificada na indústria que requer remoção de solutos dissolvidos, seja para produção de água altamente purificada ou para tratamento de efluentes industriais (Byrne, 1995).

Vale ressaltar que o emprego desse processo exige diferentes graus de pré-tratamento para a remoção de sólidos suspensos e compostos que possam causar incrustações na membrana, como microrganismos. Portanto, após o tratamento biológico, o efluente deve passar por um pré-tratamento antes de seguir para a etapa de dessalinização. Esse pré-tratamento pode ser feito por membranas de ultra ou micro filtração, filtração em areia e filtração em carvão ativado.

O objetivo desse estudo foi avaliar o desenvolvimento de uma nova combinação de processos para o tratamento de água de uma refinaria a fim de proporcionar um efluente apto à reutilização nos pontos da indústria que mais consomem água: sistema de refrigeração e geração de vapor. A nova combinação se baseia na utilização de um reator de leito móvel com biofilme (MBBR), seguido de um filtro lento de areia, com a finalidade de remover microrganismos presentes no efluente além de ser um pré tratamento para a etapa posterior, a osmose inversa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Efluente

O efluente utilizado no presente trabalho foi proveniente da Refinaria Duque de Caxias (REDUC), estado do Rio de Janeiro, Brasil, coletado após a etapa de separação de água e óleo, na saída do flotador. O efluente era composto pela água utilizada na lavagem de equipamentos, água eliminada pelos compressores, bombas e águas de processo, exceto efluente sanitário. Apresentava grande variabilidade em sua composição e grande parcela de contaminantes orgânicos, fenol, amônia entre outros.

2.2. Unidade Experimental Proposta

O MBBR substituiria as cinco lagoas já existentes na REDUC (lagoa de equalização aerada-LEA, 2 lagoas de mistura completa- LMC e 2 lagoas facultativa aeróbia- LFA). O tratamento

biológico atual da refinaria tem um tempo de residência de 80 horas, sendo que o tratamento sugerido reduziria esse tempo para 9 horas.

Após o tratamento biológico o efluente estaria apto ao descarte, ou seja, os parâmetros estariam dentro dos limites exigidos pela legislação ambiental vigente para o descarte em corpos hídricos, mas como a idéia central do estudo era produção de água para reuso, foi sugerido um tratamento terciário composto pelo filtro lento de areia, que tem por objetivo pré tratar o efluente proveniente da etapa biológica, com a remoção de sólidos suspensos e microrganismos, para a alimentação da unidade de osmose inversa, sendo esta a última etapa do tratamento.

Esse acoplamento de processos ainda não foi testado, além disso, utiliza um processo convencional, filtro de areia, antes empregado para tratamento de água, para o tratamento de efluente. A Figura 2 apresenta a unidade experimental.

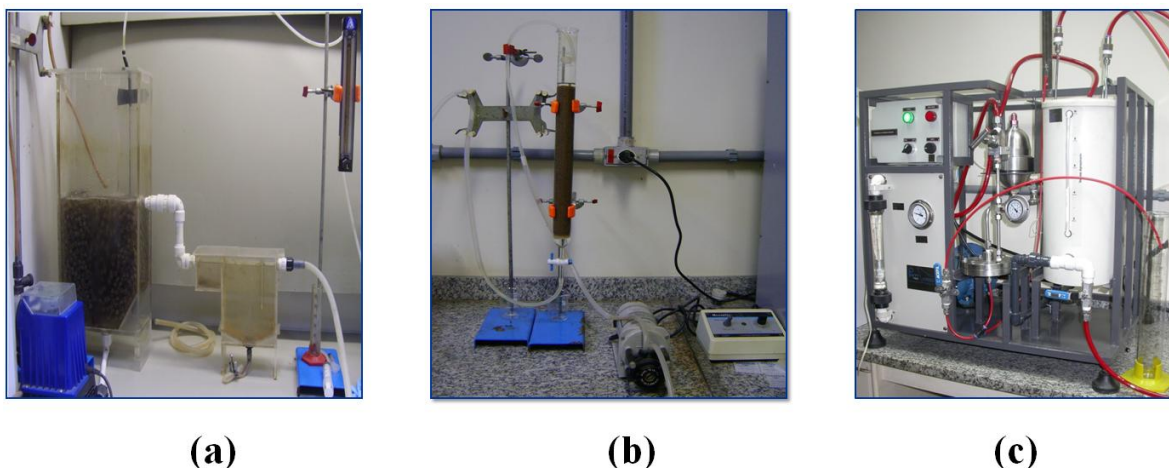


Figura 2. Unidade experimental, (a) MBBR, (b) Filtro lento de areia e (c) osmose inversa.

2.3. Condições Experimentais no MBBR

No tratamento biológico (MBBR) foi utilizado um reator retangular de 10-L, sendo o volume útil de 5-L, com fração de enchimento do suporte K1 da Kaldnes de 60% do volume reacional. O tempo de retenção hidráulica avaliado foi de 9 horas. Nessa etapa avaliou-se a remoção de matéria orgânica, nitrogênio amoniacal e fenol. Após tratamento no MBBR, o efluente passou por uma etapa de filtração lenta de areia (FLA), com intuito de remover sólidos suspensos e microrganismos.

2.4. Condições Experimentais no FLA

O filtro lento foi montado em coluna cilíndrica de vidro com 47 cm de altura e 3,7 cm de diâmetro interno, sendo preenchido com 35 cm de meio filtrante composto por areia. Este foi operado com duas taxas de filtração diferentes, 6 e 3 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, que foi definido a partir do limite de taxa utilizado em filtros lentos (2,4 a 12 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$). Ao final desse processo avaliou-se, além da

remoção de contaminantes, a remoção de microrganismos. Cabe ressaltar que, para que o filtro se encontre em condições adequadas de produzir efluente de boa qualidade, foi necessário um período de amadurecimento do mesmo, para a formação de um biofilme constituído de várias espécies microbianas. Este período foi avaliado em função da remoção de turbidez, sendo que, a partir do momento em que a turbidez se manteve estável, verificou-se o fim do amadurecimento e iniciou-se a avaliação de remoção de contaminantes e microrganismos pelo filtro, mantendo, sempre, a vazão constante e o fluxo contínuo de líquido. Avaliou-se também o fim da carreira de filtração, que foi verificado com o acompanhamento da evolução da perda de carga, através da medição do nível de líquido no interior do filtro.

2.5. Condições Experimentais na OI

Para finalizar, o efluente seguiu para um sistema de osmose inversa, no qual utilizou-se a membrana BW-30 da Dow Chemical Company, onde foi realizado um teste de permeação, à pressão de 30 bar, averiguando se o efluente obtido apresentava características adequadas para o reuso na refinaria. Antes da operação desse sistema, efetuou-se a análise do índice de densidade de sedimentos (SDI) do efluente pré e pós filtro lento, com o propósito de verificação do SDI que entraria na membrana e a diferença entre o SDI antes e após o pré tratamento. O teste do SDI tem por objetivo avaliar a tendência de bloqueio das membranas.

Para a verificação da eficiência do filtro como pré-tratamento da osmose realizou-se um teste de permeação de longa duração. Esse teste foi realizado com o objetivo de se estudar a tendência da membrana à deposição de matéria orgânica, na qual verificou-se a variação do fluxo permeado com o tempo de operação.

Além disso, realizou-se um teste de permeação averiguando a possibilidade de obtenção de um efluente apto para água de caldeira.

2.6. Métodos Analíticos

O teor de carbônico orgânico foi medido em um analisador de carbono orgânico total Shimadzu, modelo 5000 A, segundo APHA (2005). Os métodos analíticos usados para DQO, condutividade, nitrogênio amoniacal e fenol foram recomendados pela APHA (2005). A técnica de diluição em série e contagem de colônias formadoras em meios específicos foi utilizada para avaliar a remoção de microrganismos pelo filtro de areia. Fotomicrografia eletrônica de varredura e de epifluorescência das membranas de OI foram obtidas utilizando microscópio eletrônico de FEI Company Quanta 200 e microscópio Zeiss Axioplan 2, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização do Efluente Industrial

O efluente utilizado no estudo apresentava uma grande variabilidade em sua composição, contendo grande parcela de contaminantes orgânicos, fenol e amônia, além de apresentar uma alta condutividade, o que impedia o seu reuso. A Tabela 1 mostra a faixa de variação do efluente durante a execução do trabalho.

Tabela 1. Características do efluente industrial.

Parâmetro	Faixa
Temperatura (°C)	~ 26
pH	6,5 - 8,5
Condutividade(uS/cm)	800 - 1500
DQO (mg/L)	200 - 5500
COD (mg/L)	20 - 200
Amônia (mg/L)	10 - 30
Fenol(mg/L)	5 - 10
SST (mg/L)	100 - 730
SSV (mg/L)	95 - 460

3.2. Reator de Leito Móvel com Biofilme – MBBR

Observou-se, através desse estudo, que, apesar da variabilidade do efluente, a resposta do reator com biofilme foi excelente, gerando um efluente de qualidade constante. A Tabela 2 expõe os resultados obtidos nesse processo, apresentando uma faixa de valores encontrados para cada parâmetro durante todo o tempo de operação.

Tabela 2. Resultado dos parâmetros avaliados no MBBR.

Parâmetros	Entrada MBBR	Saida MBBR
COD (mg/L)	20 - 200	9 - 40
DQO (mg/L)	200 - 5500	20 - 80
DQO _{filtrada} (mg/L)	150 - 4000	15 - 80
Amônia (mg/L)	10 - 30	1 - 5
Fenol (mg/L)	5 - 10	0,02 - 0,2
Condutividade (µS/cm)	800 - 1500	800 - 1500
Temperatura (°C)	23,2 - 31,1	22,5 - 30,8
pH	6,7 - 11	6,3 - 9,1
SST (mg/L)	100 - 730	4,5 - 15
SSV (mg/L)	95 - 460	4 - 15

Em relação à remoção da demanda química de oxigênio (DQO), o reator de leito móvel com biofilme apresentou uma ótima eficiência de remoção, atingindo o patamar de 98%. Outra forma de

avaliar a remoção de matéria orgânica é através da análise de carbono orgânico dissolvido (COD) e, para esse processo, a eficiência de remoção para o COD variou entre 40 e 80%. Apesar da grande variabilidade da concentração de matéria orgânica presente na entrada do reator, a sua remoção foi alta, gerando um efluente de qualidade constante para o tempo de retenção hidráulico (TRH) avaliado, 9 horas.

A constância na qualidade do efluente, tanto em termos de DQO quanto COD, comprovam a eficiência do MBBR na remoção de matéria orgânica. Essa eficiência de remoção de matéria orgânica também foi comprovada por Ødegaard *et al.* (2004), que avaliaram o desempenho de algumas plantas MBBR para tratamentos de efluentes domésticos e industriais e verificaram excelente remoção de matéria orgânica, mesmo quando as unidades foram operadas com altas cargas orgânicas e efluentes com altas concentrações. Rusten *et al.* (2006) verificaram que o desempenho de reator com biofilme (MBBR) se mantém estável e seguro mesmo quando submetido a choques de cargas.

Assim como na remoção de matéria orgânica, o MBBR se mostrou capaz de remover compostos nitrogenados com alta eficiência, apresentando uma eficiência de remoção acima de 75% durante todo tempo de operação. Sabe-se que a remoção de amônia por processos biológicos convencionais não é facilmente obtida, uma vez que são aplicadas altas cargas orgânicas e a taxa de crescimento das bactérias nitrificantes é baixa. Entretanto, pode-se observar que a nitrificação se desenvolveu de forma plena no MBBR em conjunto com a remoção de matéria carbonácea, atingindo concentrações baixas de nitrogênio amoniacal na saída do reator.

Uma avaliação a respeito da capacidade de remoção de fenóis pelo MBBR foi feita uma vez que, entre os principais compostos presentes no efluente de refinaria de petróleo estão os hidrocarbonetos e fenóis. A remoção de fenóis totais pelo MBBR foi excelente, apresentando uma eficiência acima de 95% durante o processo.

3.3. Filtro Lento de Areia – FLA

A avaliação do desempenho da filtração lenta só foi iniciada após o tempo de amadurecimento dos filtros. A maturação do filtro foi definida em termos de turbidez, sendo que a qualidade constante do efluente, ou seja, valores de turbidez estáveis, indicava o amadurecimento do filtro. Para o filtro com taxa igual a $6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (FA1) o tempo de maturação foi de, aproximadamente, 2 dias e para a taxa de $3 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (FA 2), o tempo foi de, aproximadamente, 3 dias.

O menor tempo para o amadurecimento do filtro com maior taxa não indica uma maior eficiência no tratamento do efluente. Segundo Brito *et al.* (2005), a maturidade biológica do meio

filtrante, entendida como o equilíbrio da comunidade microbiana que se forma na superfície da areia, é menos favorecida pela taxa de filtração mais alta.

Os resultados obtidos em cada filtro lento de areia estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3. Resultado dos parâmetros avaliados nos FLA's.

Parâmetros	FA 1		FA 2	
	Entrada	Saida	Entrada	Saida
DQO (mg/L)	45 ± 9	35 ± 5	60 ± 3	35 ± 5
COD (mg/L)	14 ± 2	-	18 ± 2	-
COT (mg/L)	-	11 ± 2	-	11 ± 2
Amônia (mg/L)	1,3 ± 0,2	0,7 ± 0,2	2 ± 0,7	0,7 ± 0,2
Microrganismos (ufc)	14 - 78 * 10 ⁴	6 - 46 * 10 ⁴	53 - 79 * 10 ⁴	5 - 14 * 10 ⁴
Temperatura (°C)	26 ± 1	26 ± 1	23 ± 0,5	23 ± 0,5
pH	6 - 8	6 - 8	6 - 8	6 - 8
Turbidez (FTU)	11 - 14	4 - 5	11 - 14	4 - 5
Condutividade (µS/cm)	870 - 1300	860 - 1200	960 - 1200	950 - 1200

Observou-se que, a maior parte da matéria orgânica presente no efluente foi removida no MBBR, entretanto, o filtro de areia ainda removeu parte da DQO. Após a estabilização da comunidade microbiana, verificou-se que, para ambos os filtros, a eficiência de remoção variou entre 15 e 40%.

Em termos de remoção de nitrogênio amoniacal, o filtro, quando operado com taxa de 3 m³/m².dia, apresentou maior desempenho, atingindo uma eficiência de remoção de 60% frente a 30% obtida na maior taxa (6 m³/m².dia). Aslan e Cakici (2007) concluíram, com base nos seus resultados experimentais, que a filtração lenta pode ser usada efetivamente para remoção de compostos nitrogenados. Verificaram ainda que a maior parte da remoção se dá na camada superior do filtro lento de areia e que houve uma queda na remoção de nitrogênio quando aumentou-se a taxa de filtração.

3.3.1. Remoção de microrganismos

A intenção principal do uso de filtro lento de areia nesse conjunto de processos para tratamento de efluente era a remoção de sólidos, que podem conter microrganismos, provenientes do tratamento biológico, pré-tratando o efluente para o sistema de osmose inversa. A avaliação da eficiência de remoção de microrganismos pelo filtro lento de areia foi feita através da contagem de microrganismos por plaqueamento para ambas as taxas. A Tabela 4 elucida a variação de microrganismos, expressa em unidade formadora de colônia, na entrada e saída do filtro lento. Assim como na remoção de amônia e COD, a performance do filtro foi maior quando operado com menor taxa (3 m³/m².dia), apresentando eficiência na faixa de 75 a 90%, enquanto na maior taxa (6 m³/m².dia) a remoção foi entre 40 e 60%.

Tabela 4. Variação da concentração de microrganismos, em termos de unidades formadoras de colônia, na entrada e saída dos filtros.

Ponto de amostragem	Variação de microrganismo (ufc)	
	FA 1	FA 2
Entrada	14 a 78 *10 ⁴	53 a 79 *10 ⁴
Saida	6 a 46 *10 ⁴	5 a 14 *10 ⁴

Bellamy *et al.*,(1985), Di Bernardo (1993) e Murtha e Heller (2003) afirmam que tanto taxas mais baixas quanto maior maturidade do leito filtrante são fatores determinantes da maior eficiência microbiológica do filtro lento de areia, corroborando os resultados obtidos nesse estudo, onde a menor taxa de filtração gerou efluente com menor concentração de microrganismos.

3.3.2. Carreira de filtração

No início da filtração, com taxa constante e nível de água variável no interior do filtro, a altura de líquido sobre o leito é mínima, crescendo, gradualmente, a medida que os poros vão sendo ocupados pela aderência das partículas em suspensão, provocando um aumento da resistência à passagem de líquido. Quando o nível de líquido no filtro atinge a altura máxima, diz-se terminada a carreira de filtração e o filtro necessita de um processo de limpeza.

Quando operou-se o filtro lento com taxa de 6 m³/m².dia, a carreira de filtração foi de 63 dias, enquanto o filtro operado com taxa de 3 m³/m².dia apresentou uma carreira de filtração muito maior comparada ao filtro de maior taxa, atingindo 160 dias sem parada para limpeza. Cabe ressaltar que o funcionamento do FA 2 foi interrompido antes que se atingisse o fim da carreira de filtração devido o fim das atividades experimentais no laboratório.

3.3.3. Reuso

Como pode-se observar, a partir das Tabelas 3 e 5, o efluente após a filtração lenta em areia apresentava características adequadas para o reuso em torres de resfriamento, não necessitando, então, de tratamentos mais apurados para reuso nesse segmento. Entretanto, para reuso em caldeiras, alguns parâmetros ainda devem ser modificados a fim de se enquadrarem nos padrões exigidos.

Tabela 5. Valores recomendados para água de alimentação de torres de resfriamento e caldeiras (Adaptado de Crook, 1996 apud Oenning & Pawlowsky, 2007; * Kurita).

Parâmetros	Torre de Resfriamento	Caldeira Baixa Pressão (<10 bar)	Caldeira Média Pressão (10-50 bar)	Caldeira Alta Pressão (>50 bar)
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	12.000 *	4.000*	600-1.000*	60 *
Turbidez (NTU)	50	x	x	x
pH	6,9-9,0	7,0-10	8,2-10	8,2-9,0
Sólidos Dissolvidos (mg/L)	500	700	500	200
Dureza (mg/L)	650	350	1	0,07
SST (mg/L)	100	10	5	0,5
Alcalinidade (mg/L)	350	350	100	40
DQO (mg/L)	75	5	5	1
DBO (mg/L)	25	x	x	x
Amônia (mg/L)	20 *	1*	1*	1*
Fosfato (mg/L)	4	x	x	x
Silica (mg/L)	50	30	10	0,7
Ferro Total (mg/L)	0,5	<0,1	<0,025	<0,02

3.4. Osmose Inversa – OI

Para o reuso em caldeiras foi necessário a utilização de um sistema de osmose para a remoção de sais, diminuindo a condutividade do mesmo, e da concentração de matéria orgânica a fim de enquadrar o efluente à qualidade de água exigida em caldeiras.

Realizou-se, inicialmente, a análise do índice de densidade de sedimentos (SDI) com efluente pré e pós filtro lento, com o propósito de verificação do SDI que entraria na membrana e a diferença entre o SDI antes e após o pré tratamento. O intervalo de tempo utilizado nos testes foi de 15 minutos, ou seja, o SDI em questão é o SDI15. Para o efluente pós filtração lenta o valor de SDI foi 5, valor que se encontra dentro da faixa aceitável descrita pela literatura, que é de 3 a 5 (Amjad, 1992). O efluente pré filtro apresentou muitos sólidos suspensos, o que impediu a realização do teste de SDI, uma vez que não foi possível coletar o volume necessário para os cálculos durante a filtração.

Após verificação do SDI, foi realizado o teste de permeação com a finalidade de se obter um permeado com características adequadas ao reuso em caldeiras. Após o processo de osmose o efluente apresentou uma DQO de, aproximadamente, 2 mg/L e condutividade de 13,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, podendo ser reutilizado como água de caldeira, conforme Tabela 5. O permeado obtido durante o tratamento apresenta características adequadas para reuso em caldeiras de baixa e média pressão, sendo que a amônia já apresentava valores adequados após passagem pelo filtro lento de areia. Cabe ressaltar, ainda, que o concentrado gerado nesse processo pode ser descartado em corpos hídricos por se enquadrar nos limites de descartes exigidos pela legislação do Estado do Rio de Janeiro. As características do permeado e concentrado encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6. Características do permeado e concentrado.

Parâmetros	Permeado	Concentrado
DQO (mg/L)	1,81	55
Condutividade (µS/cm)	13,7	1239

Apurado que o efluente se mostrava apto para reuso em caldeira após o processo com membrana (OI), avaliou-se a eficiência do filtro de areia como pré-tratamento do sistema de osmose inversa. Efetuou-se um teste de longa duração (150 horas) utilizando efluente tratado pelo FLA na condição ótima ($3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$) e efluente tratado apenas pelo MBBR, no qual foi avaliada a queda do fluxo e a possível formação de bioincrustações.

A Figura 3 apresenta o resultado da avaliação do fluxo para os dois efluentes. Como pode-se observar, a queda do fluxo foi mais pronunciada quando utilizou-se efluente sem pré-tratamento, o que mostra que o filtro de areia diminuiu a quantidade de partículas responsáveis por incrustação, que é o principal motivo da redução do fluxo.

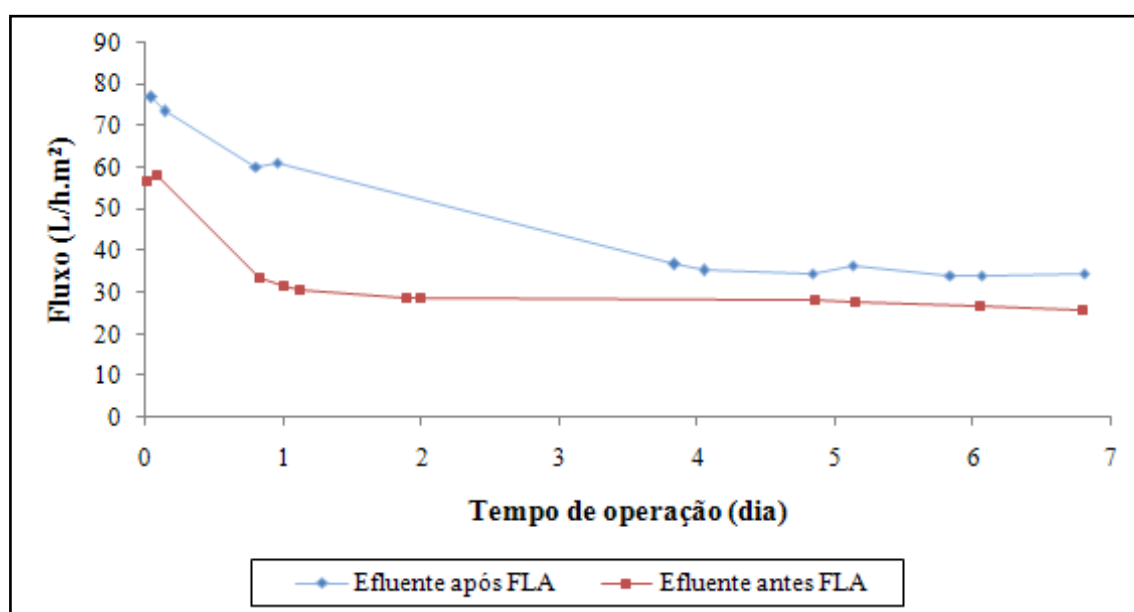


Figura 3. Análise da queda do fluxo na membrana para o efluente antes e após o FLA.

A formação de bioincrustação foi avaliada ao final do teste de permeação de longa duração, realizando-se microscopia de epifluorescência e microscopia eletrônica de varredura.

Na análise por epifluorescência verificou-se a viabilidade celular utilizando um corante fluorescente, na qual as células vivas ficavam coradas de verde, e as mortas, de vermelho. As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados para essa análise. Observa-se que a membrana apresenta maior quantidade de células coradas quando o efluente utilizado não passou pelo pré-tratamento, ou seja, o efluente tratado apenas pelo MBBR continha mais microrganismos que o efluente tratado pelo FLA. Portanto, como já era de se esperar, o efluente sem o pré tratamento apresentou um

potencial de formação de biofilme maior que o efluente após o FLA, o que comprova a eficiência desse pré-tratamento para o processo de osmose inversa.

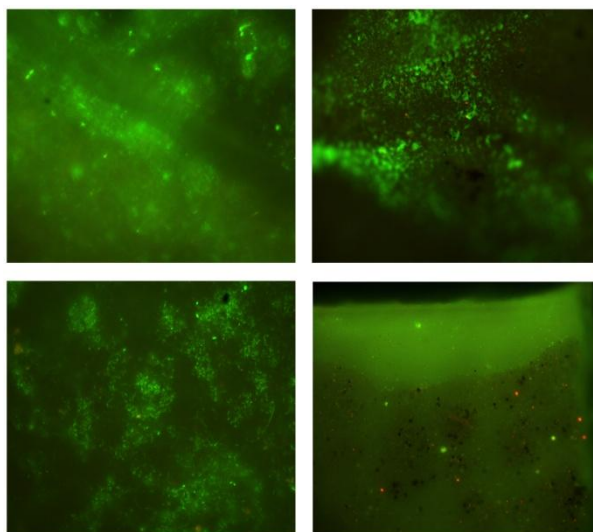


Figura 4. Resultados obtidos na microscopia de epifluorescência para o efluente sem pré-tratamento, ou seja, apenas com tratamento biológico.

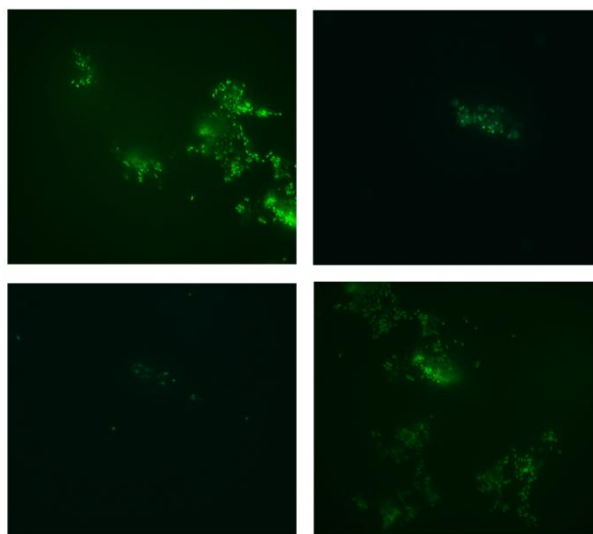


Figura 5. Resultados obtidos na microscopia de epifluorescência para o efluente após pré-tratamento, ou seja, após filtro lento de areia.

Realizou-se, ainda, inspeções por microscopia eletrônica de varredura para avaliar a evolução do crescimento microbiano. Como pode-se observar nas Figuras 6 e 7, a membrana em que foi utilizado o efluente pré tratado apresentou menor adesão de microrganismos quando comparada com a membrana em que se permeou o efluente sem pré-tratamento, corroborando com os resultados obtidos na microscopia de epifluorescência.

A partir da análise das microscopias de epifluorescência e eletrônica de varredura pode-se observar que o filtro lento de areia se apresenta como uma alternativa para o pré-tratamento de

sistemas de osmose inversa, uma vez que remove, satisfatoriamente, microrganismos, diminuindo a bioincrustação formada na membrana.

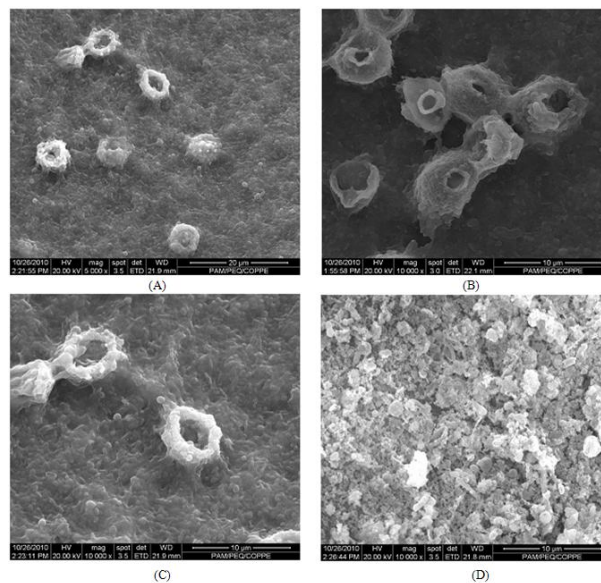


Figura 6. Fotomicrografia das membranas onde permeou-se efluente sem pré-tratamento, aumento de 5000X (A), e 10000X(B, C, D).

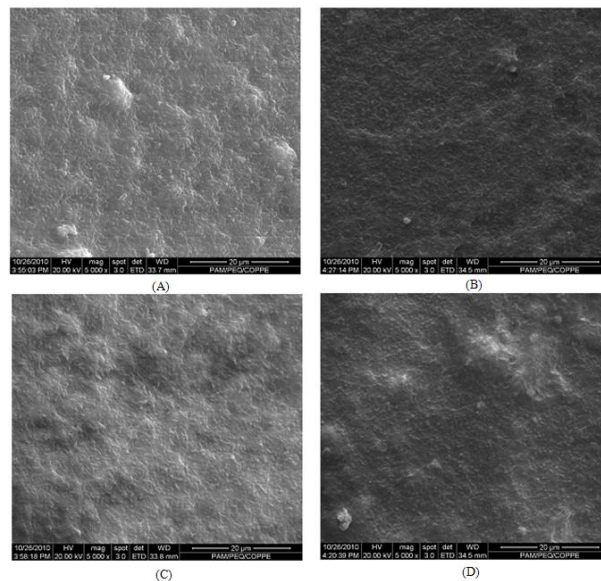


Figura 7. Fotomicrografia das membranas onde permeou-se efluente pré tratado pelo FLA, aumento de 5000X (A,B,C,D).

4. CONCLUSÃO

São destacadas as principais conclusões obtidas nesse trabalho:

- ✓ O reator MBBR apresentou uma ótima remoção de matéria orgânica, nitrogênio amoniacal e fenol gerando um efluente de qualidade constante;
- ✓ A substituição das lagoas, hoje usadas pela refinaria, pelo tratamento com MBBR reduziria o tempo do tratamento biológico de 80 horas para 9 horas, além de utilizar unidades muito mais compactas;
- ✓ O filtro lento de areia, para as duas taxas de filtração, se mostrou capaz de remover DQO e amônia, mesmo com um afluente com baixas concentrações destes. Além disso, a remoção de microorganismos foi significativa para ambas as taxas;
- ✓ O FLA , quando operado com taxa mais baixa (3 m³/m²dia), apresentou maiores remoções de amônia e microrganismos, além de apresentar uma carreira de filtração maior;
- ✓ O reuso pode ser obtido quando se trabalha com essa rota de tratamento, gerando água para torre de resfriamento após o filtro lento de areia e água para caldeira após a osmose inversa;
- ✓ Essa rota de tratamento gera uma quantidade pequena de resíduos, representada pela geração mínima de sólidos no MBBR, que pode ser recirculado para o próprio reator. Além disso, o concentrado gerado durante a operação da osmose inversa pode ser despejado em corpos receptores por apresentar características adequadas para o descarte.
- ✓ A união dos três processos, MBBR, filtro lento de areia e osmose inversa, pode produzir grandes volumes de água para reuso com custos mais baixos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelas seguintes agências brasileiras: CNPq, FAPERJ e CAPES. Os autores expressam seus agradecimentos especiais para os operadores da Refinaria Duque de Caxias (REDUC) da ETAR e do pessoal técnico do Cenpes/PETROBRAS.

BIBLIOGRAFIA

- AMJAD, Z. (1992). *Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications*, Ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- APHA, AWWA, WEF. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington DC, USA.
- ASLAN, S., ÇAKICI, H. (2007). “*Biological Denitrification of Drinking Water in a Slow Sand Filter*”, *Journal of Hazardous Materials*, 148, pp. 253-258.
- BELLAMY, W.D., SILVERMAN, D.W., HENDRICKS, D.W., *et al.* (1985). “*Removing Giardia Cysts with Slow Sand Filtration*”, *Journal American Water Works Association*, 77(2), pp. 52-60.
- BRITO, L.L.A., CARDOSO, A.B., SALVADOR, D.P., *et al.* (2005). “*Amadurecimento de Filtros Lentos de Areia e Remoção de Microrganismos Indicadores de Qualidade da Água ao Longo da Profundidade do Leito: Uma Avaliação em Instalação Piloto*”, *Engenharia Sanitária Ambiental*, 10(4), pp.307-317.
- BYRNE, W. (1995). *Reversis Osmosis – A Practical Guide for the Industrial Users*, Tall Oaks Publishing, Littleton, CO.
- DI BERNARDO, L. (1993). *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*, ABES, v. 1, pp.498, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- KURITA (Soluções em Engenharia de Tratamento de Água), “*Conceitos Básicos de tratamento de água de resfriamento*”. Editado: SILVA & CARVALHO. Disponível em: http://www.kurita.com.br/adm/download/Tratamento_de_agua_de_Resfriamento.pdf. Acesso em outubro, 2010.
- MARIANO, J.B. (2001). “*Impactos Ambientais do Refino de Petróleo*”. Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MONTEIRO, J.P., MAGRINI, A., SZKLO, A.S., *et al.* (2004). “*Gerenciamento de Água na Indústria de Refino de Petróleo e as Perspectivas de Reuso*”, UFRJ, RJ, Brasil.
- MURTHA, N.A., HELLER, L. (2003). “*Avaliação da Influência de Parâmetros de Projeto e das Características da Água Bruta no Comportamento de Filtros Lentos de Areia*”, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 8(4), pp. 257-267.
- ØDEGAARD, H., RUSTEN, B., WESSMAN, F. (2004). “*Estate of the Art in Europe of The Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Process*”. In: WEFTEC’04. New Orleans.
- OENNING JR., A., PAWLOWSKY, U. (2007). “*Evaluation of advanced technologies for water reuse in mechanical industry*”, *Sanitary Engineering and Environmental*, 12(3), pp. 305–316.
- RUSTEN, B., EIKEBROKK, B., ULGENES, Y., *et al.* (2006). “*Design and Operations of the Kaldnes Moving Bed Biofilm Reactors*”, *Aquacultural Engineering*, 34(3), pp. 322-331.