

# 6<sup>o</sup> SSSS

Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis

**ANAIS**

- VOLUME 2 -  
**ARTIGOS COMPLETOS**

---

**Tratamento de Água e Efluentes**

### ***Organizadores***

Prof. Dr. Cristiano Poletto – UFRGS (Presidente)

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cristhiane Michiko Passos Okawa – UEM

Prof. Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves – UFTM

# **ANAIS do 6º SIMPÓSIO SOBRE SISTEMAS SUSTENTÁVEIS**

- VOLUME 2 -

## **Tratamento de Água e Efluentes**



Gráfica & Editora

Toledo – PR

2021

**Copyright © 2021, by Editora GFM.**

Direitos Reservados em 2021 por **Editora GFM.**

**Editoração:** Cristiano Poletto

**Organização Geral da Obra:** Cristiano Poletto; Cristhiane Michiko  
Passos Okawa; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves

**Diagramação:** Juliane Fagotti

**Revisão Geral:** Espaço Histórico e Ambiental

**Capa:** Juliane Fagotti

**CIP-Brasil. Catalogação na Fonte**

---

Cristiano Poletto; Cristhiane Michiko Passos Okawa; Julio Cesar de Souza Inácio  
Gonçalves (Organizadores)

ANAIS do 6º SIMPÓSIO SOBRE SISTEMAS SUSTENTÁVEIS – Volume 2 –  
Artigos Completos – Tratamento de Águas e Efluentes / Cristiano Poletto; Cristhiane  
Michiko Passos Okawa; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves (Organizadores) –  
Toledo, PR: Editora GFM, 2021.

277p.: il.;

ISBN 978-65-87570-16-7

CDU 333.72

***É AUTORIZADA a livre reprodução, total ou parcial, por quaisquer meios,  
sem autorização por escrito da Editora ou dos Organizadores.***

---

# REÚSO INDUSTRIAL DE EFLUENTES PETROQUÍMICOS: UM ESTUDO DE CASO DA ULTRAFILTRAÇÃO E OSMOSE REVERSA

| ID 19080 |

**1 Andréia Barros dos Santos, 2 Aline Silveira Barreto, 3 Luciano Ribeiro Gonçalves, 4 Alessandra Nogueira Pires, 5 Alexandre Giacobbo, 6 Marco Antônio Siqueira Rodrigues**

*1 Universidade Feevale, e-mail: andreia.cetel@gmail.com; 2 Universidade Feevale, alinebarreto84@gmail.com; 3 Universidade Feevale, lucianorg@hotmail.com; 4 Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, alenpires@gmail.com; 5 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: alexandre\_giacobbo@yahoo.com.br; 6 Universidade Feevale, e-mail: marcoantonio.marco@gmail.com*

**Palavras-chave:** reúso industrial; efluente petroquímico; osmose reversa.

## Resumo

A indústria petroquímica utiliza elevados volumes de água em seus processos produtivos e geram efluentes que apresentam grande potencial para a reutilização nos processos produtivos. Neste cenário o reúso destes efluentes é uma alternativa para o desenvolvimento sustentável do setor. Portanto este estudo teve como objetivo avaliar a aplicação da ultrafiltração (UF) e osmose reversa (OR) no tratamento dos efluentes petroquímicos para produção de água de reúso industrial reduzindo impactos ambientais com a disposição de efluentes no solo. Os experimentos foram realizados com os efluentes da Lagoa 1 (LE-1), efluente da Lagoa 8 (LE-8) e efluente inorgânico (INO) utilizados como água de alimentação na unidade piloto com capacidade de tratamento de 1 m<sup>3</sup>/h. Os parâmetros avaliados nos efluentes tratados foram o cálcio, magnésio, cloreto, sulfato, condutividade, carbono orgânico total, cor, demanda química de oxigênio, pH, sólidos suspensos totais, turbidez e foram determinados os fluxos dos permeados das membranas para avaliar o desempenho do sistema piloto. Após tratamento e caracterização de cada efluente, os resultados foram comparados para a definição do efluente mais adequado para alcançar a qualidade requerida para reúso industrial. Os resultados mostraram que o tratamento (UF/OR) proposto forneceu um fluxo estável para o efluente da LE-8, e para as demais correntes houve queda acentuada de fluxo que indicam processos de incrustação das membranas de UF e OR. Quanto à eficiência do tratamento, o processo apresentou a remoção de compostos de interesse como a DQO acima de 90%, remoção

de sais e condutividade acima de 92% para os efluentes da lagoa 1, efluente da lagoa 8 e efluente inorgânico. Assim, considerando todos os aspectos avaliados neste estudo, o efluente LE-8 foi o mais adequado para ser utilizado como alimentação no sistema piloto com UF e OR, de tal modo, que o permeado produzido apresentou a qualidade necessária para reúso nas indústrias do Polo Petroquímico do Sul, atingindo qualidade equivalente à água clarificada. Desta forma, o reúso de efluentes petroquímicos tratados poderá ser uma importante fonte alternativa de recursos hídricos frente às restrições de disponibilidade e escassez nas indústrias no Sul do Brasil.

### **Introdução**

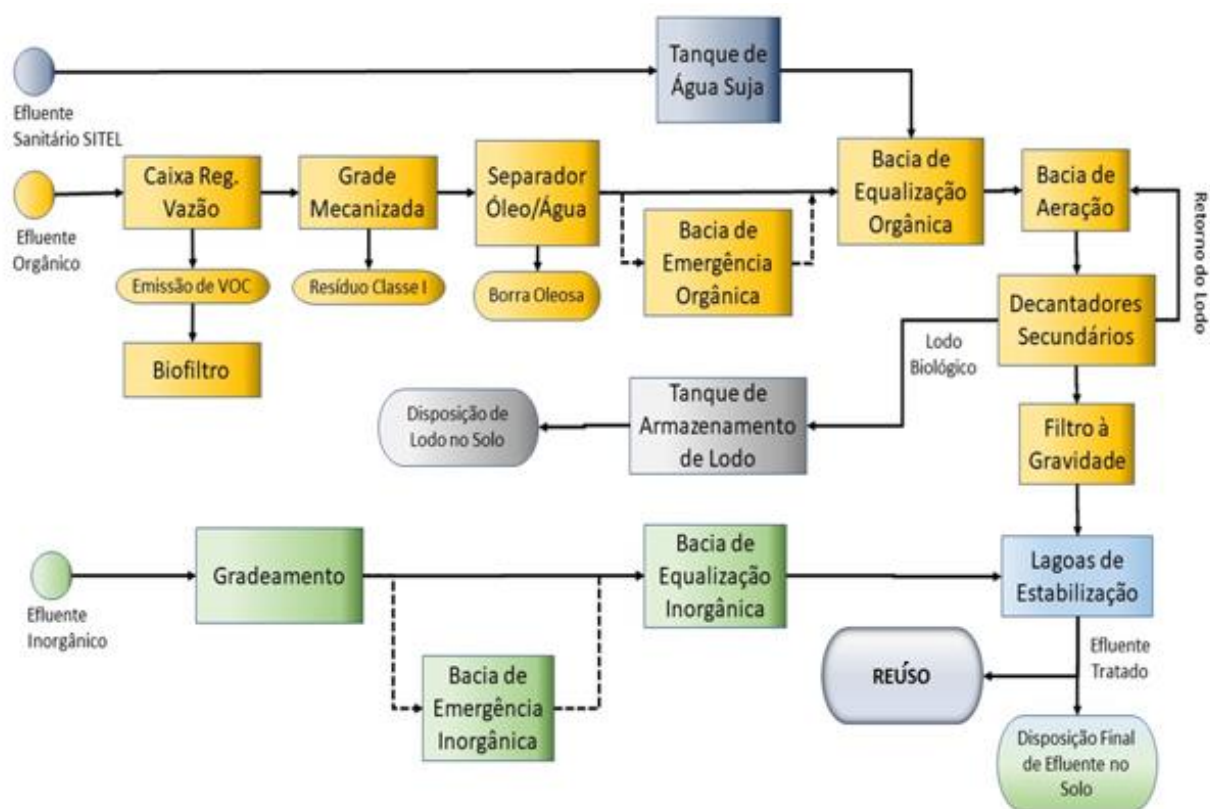
No Brasil, a indústria é responsável pela utilização de 9,1 % dos recursos hídricos (ANA, 2018). O segmento de derivados de petróleo e biocombustíveis corresponde a 11 % da produção industrial brasileira (CNI, 2017). Em 2016, o consumo absoluto de água em uma das maiores indústrias petroquímicas foi na ordem de 66 milhões de m<sup>3</sup>/ano, sendo o consumo específico de água para produção de derivados de petróleo de 4 m<sup>3</sup>/t e geração de efluentes líquidos de 1,11 m<sup>3</sup>/t (LIMA, 2018), demonstrando significativo consumo de água e geração de efluentes. Neste segmento processos como destilação, extração líquido-líquido, operações de lavagem e sistemas de refrigeração são alguns exemplos que utilizam intensivamente a água nessas indústrias (HANSEN, 2019). Assim, os efluentes gerados podem conter diferentes composições químicas, dependendo dos processos da refinaria de petróleo e do tipo de petróleo bruto utilizado (IEA, 2017).

O Polo Petroquímico do Sul utiliza como matérias-primas básicas a nafta, condensado, gás e etanol em sua cadeia produtiva (COFIP, 2021). Após o processo de craqueamento, petroquímicos básicos como eteno, propeno, butadieno, solventes e a gasolina são obtidos (SPEIGHT, 2019). Estes químicos podem ser vendidos a terceiros ou serem utilizados no processo de polimerização para a obtenção de resinas termoplásticas como polipropileno, polietileno e cloreto de polivinila que por sua vez servem de insumos para empresas transformadoras produzirem filmes plásticos, embalagens, copos, garrafas, borrachas entre outros para venda ao mercado (EPE, 2018).

A unidade de tratamento de água industrial capta cerca de 67.000 m<sup>3</sup>/dia de água bruta da Bacia do Rio Caí e produz água clarificada, desmineralizada e potável para abastecer o Polo Petroquímico do Sul. A água clarificada é utilizada na indústria para reabastecer o sistema de água de resfriamento, sistemas de tratamento de cinzas pesadas resultante da queima de carbono, além de ser empregada como água de combate a incêndio (HANSEN et.al, 2019).

As indústrias do Polo geram aproximadamente 18.000 m<sup>3</sup>/dia de efluentes líquidos

inorgânicos e orgânicos segregados na origem de acordo com a composição. Estes efluentes são recebidos na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) onde o afluente bruto inorgânico (ABI) dispõem de tratamento preliminar e primário (VENKZE et.al, 2018a). Já o afluente bruto orgânico (ABO) apresenta um sistema de tratamento composto de sistema de turbilhonamento e biofiltro Aeroferm® onde ocorre a degradação biológica de compostos orgânicos voláteis (SAPOTEC, 2021), tratamento preliminar, primário e secundário por lodos ativados com aeração prolongada (HANSEN et.al, 2019; SANTOS, 2020). Em seguida os efluentes se unificam no tratamento terciário composto por 8 lagoas de estabilização em série, para posterior lançamento no solo, onde ocorre os efeitos da evaporação, evapotranspiração e infiltração ou percolação no solo (HANSEN et.al, 2019). O fluxograma de tratamento é apresentado na Figura 1.



**Figura 1: Fluxograma do Sistema Tratamento de efluentes inorgânicos, orgânicos e sanitários na ETE da Superintendência de Tratamento de Efluentes (CORSAN/SITEL).**

O efluente terciário do Polo Petroquímico do Sul foi caracterizado e apresentou potencial para reúso industrial (HANSEN, 2016; HANSEN, 2018; VENKZE et al., 2018b) com a aplicação de tecnologias de tratamento como eletrodialise reversa e osmose reversa (VENKZE et.al, 2018a). Cientes da oportunidade, a indústria petroquímica estudada investiu na implantação de uma unidade

piloto instalada na ETE para tratamento contínuo do efluente tratado (BARRETO, 2020; GONÇALVES, 2020; SANTOS, 2020), visando avaliar a qualidade da água de reúso e o desempenho das membranas.

A caracterização do efluente tratado e a qualidade exigida para reúso são informações utilizadas para a definição das tecnologias a serem testadas. Devido aos requisitos da água empregada no Polo Petroquímico do Sul como a condutividade da água clarificada ( $165 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) e demanda química de oxigênio ( $3,5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) a osmose reversa foi selecionada como a tecnologia mais adequada para alcançar a qualidade requerida para reúso (SANTOS, 2020).

Os processos de separação por membrana tem como característica possibilitar o tratamento de efluente fornecendo um efluente tratado com qualidade que possibilita o seu reúso. Entre estes processos, a osmose reversa têm sido empregada devido ao seu alto desempenho em dessalinização e produzir água adequada para reutilização na indústria do petróleo (TANG, 2014; JAFARINEJAD, 2019).

Entretanto, a osmose reversa precisa de um controle na água de alimentação a fim de minimizar a incrustação da membrana (VENZKE et al., 2018b). A turbidez da água de alimentação deve ser monitorada e controlada para manter um desempenho constante do sistema (QASIM et al., 2019). Assim, processos como microfiltração e ultrafiltração são utilizados como pré-tratamento da água de alimentação da OR em águas residuais (YU, 2017). Neste estudo, a UF foi usada para remover a matéria coloidal e substâncias orgânicas dissolvidas na água de alimentação e proteger as membranas de OR (QASIM et al. 2019) da incrustação causada por materiais inorgânicos e orgânicos presentes em efluentes petroquímicos (LUJAN-FACUNDO et al. 2017; ROMERO-DONDIZ et al. 2016).

O objetivo deste estudo foi caracterizar 3 correntes de efluentes e utilizá-los como água de alimentação na unidade piloto de tratamento de efluente composta de ultrafiltração seguida de osmose reversa e avaliar a qualidade da água de reúso produzida, comparando com os parâmetros limitantes estipulados pelas indústrias do Polo Petroquímico do Sul.

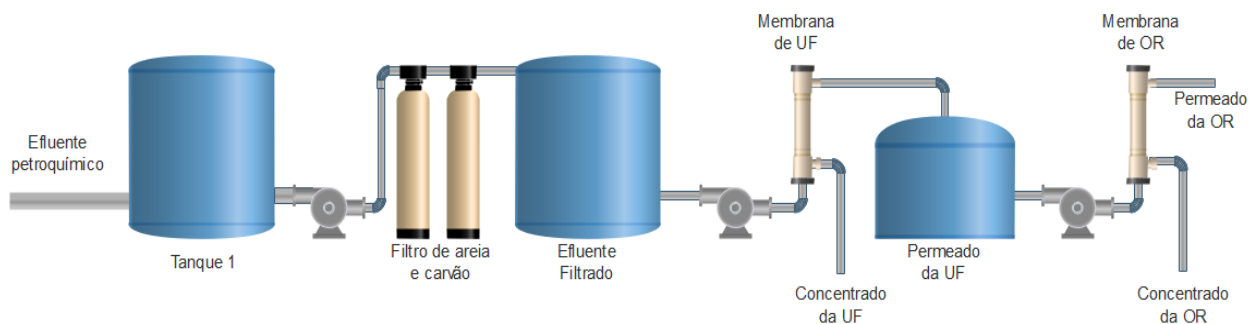
### **Material e Métodos**

Este estudo foi realizado na unidade piloto instalada na ETE do Polo Petroquímico do Sul, que tem capacidade de tratamento contínuo de  $1\text{m}^3/\text{h}$ . Na Figura 2 é apresentada a visão geral da unidade.



**Figura 2: Unidade piloto de reúso.**

A unidade de tratamento é composta por 3 tanques de armazenamento com capacidade de armazenamento de 15 m<sup>3</sup> cada, filtros de areia e carvão, UF e OR. A Figura 3 apresenta o esquema da unidade piloto.



**Figura 3: Fluxograma de tratamento na unidade piloto.**

### **Correntes de efluentes petroquímicos tratados**

Neste estudo, os efluentes utilizados como água de alimentação da unidade piloto foram captados em diferentes etapas do tratamento, conforme apresentado na Figura 4.





**Figura 4: Pontos de captação dos efluentes testados.**

Os pontos foram definidos conforme o tipo de efluente, origem e processo de tratamento, descritos na tabela 1.

**Tabela 1: Tipos de água de alimentação (afluente) utilizadas no sistema piloto de reúso.**

<b>Tipo</b>	<b>Origem</b>	<b>Tratamento</b>
Efluente inorgânico (INO)	Efluente inorgânico tratado	Preliminar e Primário.
Efluente da Lagoa 1 (LE-1)	Unificação do efluente secundário e efluente inorgânico tratado	Preliminar, Primário e Secundário por lodos ativados
Efluente da Lagoa 8 (LE-8)	Efluente terciário da última lagoa de estabilização da ETE.	Terciário Lagoas de Estabilização

### **Ultrafiltração**

Os experimentos com o sistema de UF foram realizados por 45 dias, 6 horas por dia com cada um dos efluentes testados. O sistema piloto operou com pressão de 2,5 bar na UF e temperaturas na faixa de 18 a 22 °C, sendo composto de filtro bobinado de 20 µm e duas membranas de UF de polietersulfona com massa molecular de corte de 10.000 Da, modelo PW4040F30. A este equipamento foi instalado um sistema de limpeza automática da membrana, que injeta no sistema 10 litros de água potável por 6 minutos em intervalos de 30 minutos para prevenir incrustações. A dosagem de 1 mg.L<sup>-1</sup> de biocida Acticide DB 20 fornecido pela empresa Thor Brasil LTDA foi dosado no afluente e 3,2 L.h<sup>-1</sup> de hipoclorito de sódio 4 % após o filtro de areia. Para avaliar o desempenho da ultrafiltração foram considerados a frequência de limpeza e a estabilidade do fluxo do permeado da UF. Quando observada a redução do fluxo em 10 %, a limpeza química foi realizada para restabelecimento do fluxo do permeado da UF.

### Osmose Reversa

O sistema piloto de OR é composto por quadro elétrico, bomba de alta pressão, medidores de vazão, manômetros, filtro de cartucho de 5  $\mu\text{m}$ , trocador de calor, horímetro e membrana de poliamida BW30 (4040). Este sistema operou com pressão de 4 bar por 45 dias, 4 horas por dia, utilizando o permeado da ultrafiltração como água de alimentação, para cada uma das correntes de efluente testadas. A limpeza diária por 20 minutos com o permeado foi realizada durante os experimentos. Para o desempenho do sistema piloto de OR foram considerados a frequência de limpeza e estabilidade do fluxo do permeado da OR. A qualidade da água de reúso produzida foi avaliada comparando a qualidade do permeado da OR com os parâmetros limitantes estipulados pelas indústrias do Polo Petroquímico do Sul. Neste estudo a água de reúso produzida com as 3 correntes de efluentes serão comparadas com os padrões limitantes para reúso como água clarificada, apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2: Parâmetros da água clarificada requerida no Polo Petroquímico do Sul.**

Parâmetro	Água clarificada	Parâmetro	Água clarificada
Cálcio ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	30	Magnésio ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	0,5
Cloreto ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	22	pH	7,0 - 8,0
Condutividade ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	165	SST ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	2
Cor ( $\text{mg. Pt-Co. L}^{-1}$ )	<10	Sulfato ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	22
DQO ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	3,5	Turbidez (NTU)	1
Ferro ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	0,1		

Na tabela 3 estão descritos os dados das membranas de ultrafiltração e osmose reversa utilizadas nos experimentos.

**Tabela 3: Características das membranas de ultrafiltração e osmose reversa.**

Modelo	PW4040F30 GE <sup>a</sup> UF	BW 30 (4040) FILMTEC <sup>b</sup> OR
Material	Polietersulfona	Poliamida
Configuração	Espiral	Espiral
Área de membrana ( $\text{m}^2$ )	7,3	7,2
pH de alimentação	4 - 11	2 - 11
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	50	45
Pressão (bar)	5 - 9,5	15,5
Limite de tolerância de cloro ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	5	< 0,1
Máximo de SDI (15 minutos)		5
Média de rejeição a sais (%)		99,5

a- Adaptado de GE - Lenntech (2015). b- Adaptado de FILMTEC™ (2018).

## Métodos Analíticos

A caracterização das correntes de alimentação e permeados foi realizada de acordo com a metodologia descrita no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 22 ed.*, listada na tabela 4.

**Tabela 4: Lista de parâmetros e respectivos métodos analíticos utilizados na caracterização dos efluentes.**

Parâmetro	Metodologia <sup>a</sup>	Parâmetro	Metodologia <sup>a</sup>
Cálcio	SM 3111 D	Magnésio	SM 3111 B
Carbono Orgânico total (COT)	SM 5310 B	pH	SM 4500 H+
Cloreto	SM 4110 B	Sólidos Dissolvidos Totais	SM 2540 C
Condutividade	SM 2510 B	Sólidos Suspensos Totais	SM 2540 D
Cor	SM 2120 C	Sulfato	SM 4110 B
Demanda Química de Oxigênio	SM 5220 C	Turbidez	SM 2130 B
Ferro	SM 3111 B		

<sup>a</sup> *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22<sup>nd</sup> edition* (RICE et al., 2012).

## Resultados e Discussão

### Caracterização das correntes utilizadas no sistema piloto de reúso

Durante a operação da ETE, a concentração de poluentes nos efluentes petroquímicos apresentaram variações inerentes aos processos produtivos, devido à estação, clima e manutenção da planta, o que pode afetar o desempenho dos processos de tratamento e a qualidade dos efluentes utilizados como água de alimentação no sistema piloto de reúso. A variação dos parâmetros físico-químicos de interesse para reúso na água de alimentação dos 3 efluentes testados são apresentados na tabela 5.

A cor presente nos efluentes testados decorre da decomposição de substâncias húmicas naturais, presença de compostos orgânicos conjugados (STEVENSON, 1982) e algas. Desta forma, o efluente terciário LE-8 apresenta valores significativamente maiores decorrentes do tempo de detenção do efluente no sistema terciário da ETE. Além disso, ressalta-se que a cor presente no INO está associada à proliferação de algas no sistema de tratamento do efluente inorgânico durante o experimento.

**Tabela 5: Caracterização das correntes de efluentes tratados utilizados como água de alimentação na unidade piloto.**

Parâmetro	Unidade	LE-1	LE-8	INO	LQ
Cálcio	(mg.L <sup>-1</sup> )	25,16 ± 2,75	16,17 ± 0,79	49,58 ± 4,13	0,021
COT	(mg.L <sup>-1</sup> )	17,1 ± 1,55	8,45 ± 0,21	24,83 ± 5,55	-
Cloreto	(mg.L <sup>-1</sup> )	110,47 ± 25,27	43,01 ± 0,96	97,79 ± 37,46	1,297
Condutividade	(μS.cm <sup>-1</sup> )	1064,55 ± 84,7	868,84 ± 35,02	1916,8 ± 210	1 – 5000
Cor aparente	(mg. Pt-Co. L <sup>-1</sup> )	14,8 ± 3,04	57,35 ± 9,97	40,1 ± 36,2	6,4
DQO	(mg.L <sup>-1</sup> )	50,72 ± 13,1	35,24 ± 13,9	47,41 ± 4,55	45,07
Ferro	(mg.L <sup>-1</sup> )	0,204 ± 0,05	0,37 ± 0,07	0,14 ± 0,02	0,02
Magnésio	(mg.L <sup>-1</sup> )	9,66 ± 1,48	5,21 ± 0,195	13,31 ± 1,97	0,003
pH	-	7,40 ± 0,30	7,63 ± 0,01	8,48 ± 0,49	1-14
SST	(mg.L <sup>-1</sup> )	6,7 ± 5,23	2,55 ± 0,63	12,5 ± 6,53	2,1
Sulfato	(mg.L <sup>-1</sup> )	201,64 ± 19,85	220,3 ± 23,6	657,87 ± 46,76	1,139
Turbidez	(NTU)	5,15 ± 0,14	23,17 ± 6,1	11,02 ± 4,71	0,15

LQ: Limite de Quantificação

O carbono orgânico total presente nas 3 correntes estudadas é altamente dependente da massa molar dos compostos orgânicos, de forma que a rejeição destes compostos no sistema de UF poderá ser reduzida se apresentarem massa molar menor que a massa de corte da membrana de UF, causando incrustações na membrana de OR (WANG, 2011). Assim, o pré-tratamento com filtro de areia e carvão antes da UF, dosagem de Acticide DB 20 e hipoclorito de sódio 4 % foram utilizados como alternativas para aumentar o tempo de vida dos elementos de UF e prevenir incrustações na OR.

Verificou-se concentrações mais elevadas de cálcio, cloreto, magnésio e sulfato no efluente INO que, aliado ao pH básico do efluente, ocasionou incrustação inorgânica nas membranas de ultrafiltração e de osmose reversa, reduzindo os fluxos dos permeados. Este efluente apresentou maior variabilidade da carga de poluentes em relação às demais correntes testadas. Essas variações na água de alimentação contribuem para a formação de *fouling* e *biofouling* nas membranas de UF e OR, aumentando assim a frequência de limpeza no sistema para manter os fluxos dos permeados constantes.

Já o efluente da LE-8, apresentou maior turbidez dentre as correntes estudadas devido à presença de algas, material coloidal e biológico em suspensão no sistema terciário da ETE, sendo controlado pela dosagem de Acticide DB 20 e hipoclorito de sódio na unidade piloto. Desta forma, avaliando a caracterização e os resultados de cor, COT e turbidez nos 3 efluentes testados a ultrafiltração foi utilizada como pré-tratamento para a redução destes parâmetros na água de alimentação da OR.

### Efeitos da composição do efluente nos fluxos de permeado da ultrafiltração

Durante a aplicação da ultrafiltração o fluxo de permeado é um fator crítico no que diz respeito à eficiência do tratamento, estabilidade de operação e incrustação da membrana (LI, 2017; TIN et al., 2017). A fim de definir a corrente mais adequada como água de alimentação da unidade piloto os 3 efluentes foram tratados no sistema de ultrafiltração para avaliar a eficiência de remoção e a incrustação da membrana. A frequência de limpeza para cada efluente testado foi registrada e utilizada como um indicador de incrustação na membrana. A UF operou com o efluente da LE-1 como água de alimentação e apresentou fluxo médio de  $14,1 \pm 3,2 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . Durante o período de realização dos testes a limpeza química com hidróxido de sódio 0,01 M, ácido clorídrico 0,01 M e hipoclorito de sódio 0,2 % foi realizada cinco vezes devido à queda do fluxo. O efluente apresentou significativa quantidade de material biológico, assim uma limpeza diária de 20 minutos com hipoclorito de sódio 0,2 % foi adotada para operação da UF.

Com o efluente da LE-8 como água de alimentação, a UF apresentou fluxo médio de  $14,3 \pm 1,79 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . A limpeza diária com hipoclorito de sódio 0,2 % foi realizada para manter o fluxo de operação estável durante a realização do experimento. Realizada apenas uma limpeza química com hidróxido de sódio 0,01 M, ácido clorídrico 0,01 M e hipoclorito de sódio 0,2 % durante o período do teste.

Durante a operação da ultrafiltração utilizando o efluente INO como água de alimentação verificou-se fluxo médio de  $9,1 \pm 3,5 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . Após 40 dias de operação foi necessária a substituição do filtro cartucho que colmatou devido ao acúmulo de material biológico como algas, larvas e formação de material gelatinoso na superfície. Neste período foi observada a maior redução de fluxo da UF, a limpeza química com hidróxido de sódio 0,01 M, ácido clorídrico 0,01 M e hipoclorito de sódio 0,2 % foi realizada 4 vezes, porém o fluxo não foi recuperado. Além da limpeza diária por 20 minutos com hipoclorito de sódio 0,2 %, uma limpeza química com metabissulfito de sódio 0,1 % foi necessária para o reestabelecimento do fluxo da membrana.

Desta forma, o fluxo da UF foi um dos critérios utilizados para definição da corrente mais adequada para alimentar o sistema piloto. Portanto, analisando os resultados obtidos neste estudo, verificou-se que os fluxos da ultrafiltração para o efluente da LE-1 e INO foram reduzidos em mais de 10%, demandando frequentes paradas para limpeza química, o que ocasionou interrupções no processo de produção de permeado para alimentar o sistema de OR. Esta redução pode estar associada a maior concentração de sólidos suspensos totais e carbono orgânico total nos efluentes LE-1 e INO. Além disso, nestas correntes observou-se concentrações mais elevadas de cálcio e

magnésio quando comparadas com o efluente da LE-8. Assim, para o efluente da LE-8 apenas uma limpeza química na UF foi realizada no período dos testes.

Considerando os resultados de fluxos e a frequência de limpeza, o efluente LE-8 demonstrou ser o efluente com menor tendência a incrustação da membrana de UF, após a dosagem de Acticide DB 20 e hipoclorito de sódio 4%.

### Caracterização dos Permeados da Ultrafiltração

Os permeados da UF com cada um dos efluentes foram analisados para investigar as contribuições de cada unidade do processo para a remoção de poluentes. Na tabela 6 estão descritos os resultados da UF.

Após filtrar os efluentes, o processo de UF diminuiu a turbidez e removeu sólidos suspensos totais. O incremento na concentração de cloreto e na condutividade dos permeados da ultrafiltração ocorreram devido à dosagem de hipoclorito de sódio para reduzir o *biofouling* (JIANG, 2017) causado por material biológico (matéria orgânica, microrganismos e algas) no efluente.

**Tabela 6: Caracterização dos permeados dos efluentes INO, LE-1 e LE-8 após ultrafiltração.**

Parâmetro	Permeado UF LE-1	Permeado UF LE-8	Permeado UF INO
Cálcio (mg.L <sup>-1</sup> )	20,87 ± 4,40	13,48 ± 1,17	38,75 ± 9,52
Carbono orgânico (mg.L <sup>-1</sup> )	13,8 ± 3,53	5,0 ± 1,13	16,7 ± 7,55
Cloretos (mg.L <sup>-1</sup> )	117,9 ± 35,3	70,8 ± 5,7	152,9 ± 53,2
Condutividade (µS.cm <sup>-1</sup> )		877,92 ± 51,35	2081,36 ± 482,4
Cor (mg. Pt-Co. L <sup>-1</sup> )	9,75 ± 4,73	<6,4	<6,4
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	21,5 ± 1,27	22,3 ± 1,34	22,7 ± 1,27
Ferro (mg.L <sup>-1</sup> )	0,159 ± 0,016	0,02 ± 0,01	0,06 ± 0,02
Magnésio (mg.L <sup>-1</sup> )	9,49 ± 1,04	5,16 ± 0,07	10,8 ± 3,01
pH	7,01 ± 0,04	7,44 ± 0,27	8,0 ± 0,42
SST (mg.L <sup>-1</sup> )	<2,1	<2,1	<2,1
Sulfato (mg. L <sup>-1</sup> )	185,93 ± 10,68	185,68 ± 21,13	647,63 ± 103,9
Turbidez (NTU)	0,183 ± 0,05	0,45 ± 0,46	0,18 ± 0,06

Para desempenho da UF foram avaliados os percentuais de remoção de COT, SST e turbidez. Os percentuais de remoção foram 19,3 %, 68,6 % e 96,4 % para o efluente LE-1, 40,8 %, 17,6 % e 98,1 % para o efluente LE-8 e 32,8 %, 83,2% e 98,4 % para o efluente INO. Os resultados indicam que o sistema de UF apresentou remoção de sólidos suspensos totais e turbidez para todas as correntes testadas. Entretanto, as concentrações de COT no permeado da UF podem causar queda de fluxo no sistema de OR. Segundo Malaeb e Ayoub (2011), a incrustação orgânica da membrana ocorre devido

a elevadas concentrações de COT em águas residuais, na faixa de 10 a 20 mg.L<sup>-1</sup>. Dentre as correntes testadas apenas o permeado da UF da LE-8 apresentou carbono orgânico total igual a 5 mg.L<sup>-1</sup>, abaixo da referida faixa, valor este adequado para alimentar o sistema piloto de OR.

### Caracterização dos permeados da osmose reversa e comparação com padrões para reúso

Para avaliar o desempenho da OR a qualidade dos permeados gerados no sistema piloto de reúso foram comparados com os parâmetros estabelecidos para água clarificada na indústria estudada. Estes parâmetros são relevantes para garantir a confiabilidade dos processos de produção da indústria (HANSEN et.al, 2019). Considerando a caracterização dos permeados da OR, observou-se eficiência na remoção dos compostos de interesse. Os valores são apresentados na tabela 7.

**Tabela 7: Caracterização dos permeados dos efluentes LE-1 e LE-8 e INO após osmose e padrão limitante para reúso como água clarificada.**

Parâmetro	Permeado OR LE-1	Permeado OR LE-8	Permeado OR INO	Padrão da Água Clarificada
Cálcio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,43 ± 0,32	0,10 ± 0,01	0,21 ± 0,12	30
Cloreto (mg.L <sup>-1</sup> )	3,77 ± 0,78	3,23 ± 0,16	4,25 ± 3,77	22
Condutividade (µS.cm <sup>-1</sup> )	44,04 ± 1,53	23,15 ± 1,51	40,52 ± 30,86	165
Cor (mg. Pt-Co. L <sup>-1</sup> )	<6,4	<6,4	<6,4	<10
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	<2,85	<2,85	3,76 ± 1,29	3,5
Ferro (mg.L <sup>-1</sup> )	0,024 ± 0,004	0,02 ± 0,003	0,030 ± 0,01	0,1
Magnésio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,06 ± 0,018	0,05 ± 0,001	0,06 ± 0,03	0,5
pH	6,25 ± 0,26	6,81 ± 0,17	8,21 ± 1,18	7,0 - 8,0
SST (mg.L <sup>-1</sup> )	<2,1	<2,1	<2,1	2
Sulfato (mg. L <sup>-1</sup> )	<1,139	<1,139	1,18 ± 0,07	22
Turbidez (NTU)	<0,15	0,2 ± 0,06	0,11 ± 0,01	1

O efluente INO apresentou DQO acima do limite estabelecido para reúso, e todas as correntes testadas necessitam de ajuste de pH para atender os padrões de reutilização da indústria. Avaliando a condutividade requerida para reúso (165 µS.cm<sup>-1</sup>), verificou-se após tratamento com a OR que todos os permeados atingiram os padrões estabelecidos para reutilização. As concentrações de COT (mg.L<sup>-1</sup>) nos permeados foram de 8,07 ± 6,96; 1,3 ± 0,85 e 2,0 ± 0,4, respectivamente para INO, LE-1 e LE-8, demonstrando menor eficiência de remoção no permeado do INO devido à caracterização deste efluente. Estudos mostraram que os orgânicos podem passar através da membrana de OR (DRAŽEVIĆ et al. 2017).

O processo combinado de ultrafiltração e osmose reversa tem recebido cada vez mais atenção no tratamento de águas residuais petroquímicas, devido a sua alta eficiência para remoção de

compostos orgânicos e sais presentes nos efluentes industriais secundários e terciários (HAIDARI, 2018, KAMALI, 2019). Na figura 5, foram apresentadas as variações dos fluxos dos permeados da osmose reversa no período dos testes.

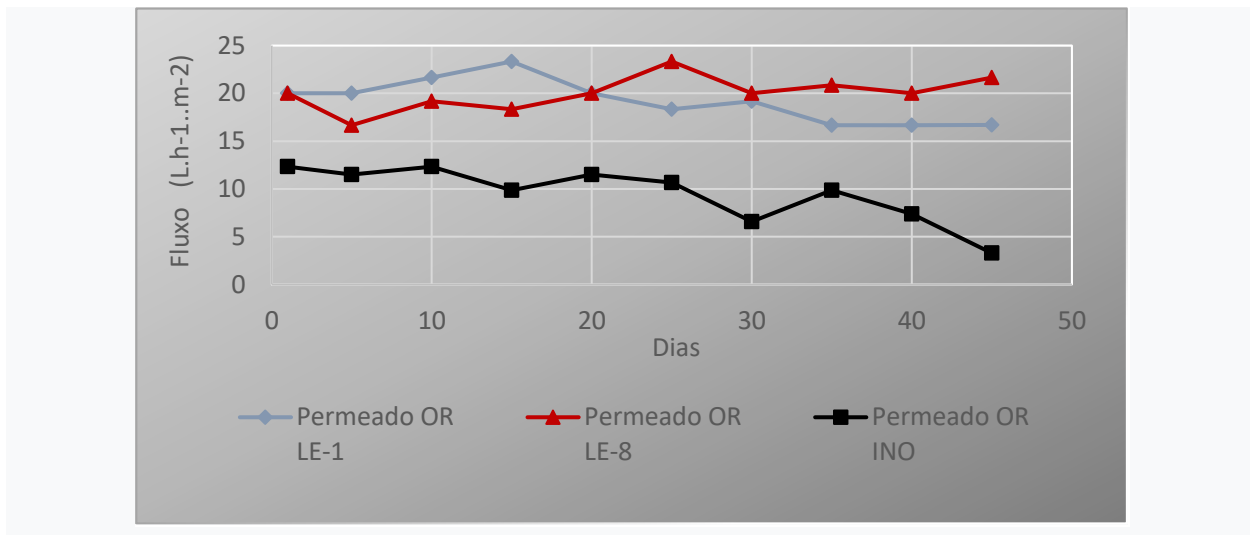


Figura 5: Fluxo dos permeados da OR com os efluentes LE-1, LE-8 e INO.

Observou-se durante a operação da OR com o permeado da LE-1 como água de alimentação, uma estabilidade do fluxo nos primeiros 15 dias e após este período houve queda do fluxo devido a *biofouling*, causado por algas e demais materiais biológicos presentes no permeado da UF da LE-1, ocasionado a proliferação de microrganismos na superfície da membrana devido compostos orgânicos adsorvidos e nutrientes solúveis na água de alimentação (JIANG, 2017). O fluxo médio da OR durante a realização do experimento foi de  $19,6 \pm 2,1$  L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>.

Já o permeado da LE-8 apresentou fluxo estável nos primeiros 20 dias de operação e redução do fluxo no restante do período, que se manteve em média  $20,8 \pm 2,5$  L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>. Por apresentar a menor concentração de carbono orgânico total no permeado da UF da LE-8, esta corrente apresentou menor tendência a incrustação e manteve o fluxo estável no período avaliado.

Por fim, o INO, apresentou fluxo médio de  $9,14 \pm 3,8$  L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup> e queda acentuada do fluxo durante o experimento. Para esta corrente foi necessário uma limpeza química com hidróxido de sódio 0,01 M e ácido clorídrico 0,01 M após 35 dias de operação que aumentou o fluxo, porém nova redução foi observada. O desempenho desses sistemas de tratamento de OR depende de vários fatores, incluindo os parâmetros de operação como taxa de fluxo de alimentação, tempo de retenção, pH, temperatura e características da água de alimentação. Considerando os resultados da caracterização do permeado da UF do INO, com concentrações de sais, metais e pH mais elevados



que as demais correntes testadas, pode ter ocasionado durante a operação da OR o fenômeno de polarização de concentração (QASIM et al. 2019).

Assim, o efluente da LE-8 apresentou fluxo estável durante o período avaliado e demonstra ser a corrente mais adequada para reúso.

### **Considerações Finais**

Este estudo utilizou um processo combinado de ultrafiltração e osmose reversa para o tratamento de efluente petroquímico. A ultrafiltração mostrou-se capaz de minimizar incrustações, depósitos e degradação da membrana, otimizando a produção de permeado, além de garantir os requisitos mínimos para alimentação da OR.

Os resultados mostraram que o processo proposto forneceu um fluxo estável para o efluente da LE-8, porém para as demais correntes houve queda acentuada de fluxo que indicam processos de incrustação das membranas de UF e OR. Quanto à eficiência do tratamento, o processo apresentou desempenho para a remoção de compostos de interesse como a DQO acima de 90 %, remoção de sais e condutividade acima de 92% para os efluentes da LE-1, LE-8 e INO.

Considerando a caracterização dos permeados, observou-se a eficiência da OR na remoção dos compostos de interesse para reutilização. Assim, considerando todos os aspectos avaliados neste estudo, o efluente LE-8 foi o mais adequado para ser utilizado como alimentação no sistema piloto com UF e OR, de tal modo, que o permeado produzido apresentou a qualidade necessária para reúso nas indústrias do Polo Petroquímico do Sul, atingindo qualidade equivalente à água clarificada.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a parceria firmada entre Comitê de Fomento Industrial do Polo Petroquímico (COFIP) e Companhia Riograndense de Saneamento CORSAN e a todos os profissionais envolvidos neste projeto que proporcionaram a realização da pesquisa. Agradecemos também o suporte técnico durante a operação da unidade piloto fornecido pela Superintendência de Tratamento de Efluentes Líquidos (SITEL).

### **Referências Bibliográficas**

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2018. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília: ANA, 2018. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/porta/publicacao/Conjuntura2018.pdf>. Acesso em: 22 de jun. 2019.

BARRETO, A.S. 2020. Avaliação do pré-tratamento para processos de separação por membranas no tratamento de efluente petroquímico. Dissertação - Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais. Feevale, Novo Hamburgo - RS.

CNI, Indústria em número. 2017. Brasília. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2017/7/a-industria-em-numeros/#aindustria-em-numeros-dezembro-2017>. Acesso em: 24 junho 2020.

COFIP. 2021. Disponível em: <http://www.cofiprs.com.br/distrito-cofip-comite-de-fomento-industrial-do-polo>. Acesso em 21 de janeiro de 2021.

DRAŽEVIĆ, Emil et al. 2017. Permeability of uncharged organic molecules in reverse osmosis desalination membranes. *Water Research*, v. 116, p. 13-22.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. 2018. Panorama do Refino e da Petroquímica no Brasil. Rio de Janeiro. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-/topico-412/NT%20Refino%20e%20Petroqu%C3%ADmica\\_2018.11.01.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-/topico-412/NT%20Refino%20e%20Petroqu%C3%ADmica_2018.11.01.pdf). Acesso em: 21 de fevereiro 2021.

FILMTEC™. 2018. Formulário N.º- 609-00071-1009, Technical Manual, Filmtec™. Reverse Osmosis Membranes. Disponível em: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Filmtec-Reverse-Osmosis-Membranes-L.pdf>. Acesso em: 20 julho 2018.

GE. 2015. Lenntech Fact sheet, GE-PW-Series-Industrial-Ultrafiltration-Post-treatment-RO-NF-Lenntech. Disponível em: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/GE-PW-Series-L.pdf>. Acesso em: 21 de fevereiro 2021.

GONÇALVES, L. R. 2020. Avaliação do Processo de eletrodíálise reversa aplicado no tratamento de efluentes petroquímicos. Dissertação - Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais. Feevale, Novo Hamburgo - RS.

Haidari, A. H.; Heijman, S. G. J.; Van der Meer, W. G. J. 2018. Optimal design of spacers in reverse osmosis. *Separation and purification technology*, v. 192, p. 441-456.

Hansen, Everton; Rodrigues, Marco Antônio Siqueira; De Aquim, Patrice Monteiro. 2016. Wastewater reuse in a cascade based system of a petrochemical industry for the replacement of losses in cooling towers. *Journal of environmental management*, v. 181, p. 157-162.

Hansen, Everton; Rodrigues, Marco Antônio Siqueira; De Aquim, Patrice Monteiro. 2019. Characterization of aqueous streams in a petrochemical industry: A study for the reuse of industrial effluents. *Journal of water process engineering*, v. 27, p. 99-109.

IEA, Oil Market Report: World Oil Supply. 2017. International Energy Agency (IEA). Disponível em <https://www.iea.org/OILMARKETREPORT/OMRPUBLIC/>. Acessado em 19 de março, 2018.

Jafarinejad, Shahryar; Jiang, Sunny C. 2019. Current technologies and future directions for treating petroleum refineries and petrochemical plants (PRPP) wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 7, n. 5, p. 103326.

Jiang, Shanxue; Li, Yuening; LadeWig, Bradley P. 2017. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of the Total Environment*, v. 595, p. 567-583.

Kamali, Mohammadreza et al. 2019. Sustainability considerations in membrane-based technologies for industrial effluents treatment. *Chemical Engineering Journal*, v. 368, p. 474-494.

- LI, Wende et al. 2017. Reverse osmosis membrane, seawater desalination with vibration assisted reduced inorganic fouling. *Desalination*, v. 417, p. 102-114.
- LIMA, Eduardo Pedrosa da Cunha. 2018. Água e indústria: experiências e desafios. Brasília: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC)/Infinita Imagem, p. 57-60.
- LUJÁN-FACUNDO, María-José et al. 2017. Membrane fouling in whey processing and subsequent cleaning with ultrasounds for a more sustainable process. *Journal of cleaner production*, v. 143, p. 804-813.
- MALAEB, Lilian; AYOUB, George M. 2011. Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. *Desalination*, v. 267, n. 1, p. 1-8.
- QASIM, Muhammad et al. 2019. Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, v. 459, p. 59-104.
- RICE, E.W; Baird, R.B.; Eaton, A.D; Clesceri L.S. (Eds.). 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd ed, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. American Water Works Association, Washington, D.C.
- ROMERO-DONDIZ, Estela María et al. 2016. Comparison of the performance of ultrafiltration and nanofiltration membranes for recovery and recycle of tannins in the leather industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 71-79.
- SANTOS, A.B. 2020. Reúso de efluente petroquímico empregando osmose reversa. Dissertação - Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais. Feevale, Novo Hamburgo - RS.
- SAPOTEC. 2021. Disponível em: <https://www.sapotecsul.com.br/#7>. Acesso em: 12 janeiro 2021.
- SPEIGHT, James G. 2019. Handbook of industrial hydrocarbon processes. 2 Edição. Gulf Professional Publishing, p.173-181.
- STEVENSON, F. J. 1982. Extraction, fractionation, and general chemical composition of soil organic matter. Humus chemistry. Genesis, composition, reactions, p. 26-54.
- TANG, Fang et al. 2014. Fouling of reverse osmosis membrane for municipal wastewater reclamation: autopsy results from a full-scale plant. *Desalination*, v. 349, p. 73-79.
- TIN, Moe Ma Ma et al. 2017. Membrane fouling, chemical cleaning and separation performance assessment of a chlorine-resistant nanofiltration membrane for water recycling applications. *Separation and Purification Technology*, v. 189, p. 170-175.
- YU, L.; HAN, M.; HE, F. 2017. A review of treating oily wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 10, p. S1913-S1922.
- WANG, Yi-Ning; TANG, Chuyang Y. 2011. Protein fouling of nanofiltration, reverse osmosis, and ultrafiltration membranes the role of hydrodynamic conditions, solution chemistry, and membrane properties. *Journal of Membrane Science*, v. 376, n. 1-2, p. 275-282.
- VENZKE, Carla Denize et al. 2018a. Integrated Membrane Processes (EDR-RO) for Water Reuse in the Petrochemical Industry. *Journal of Membrane Science and Research*, v. 4, n. 4, p. 218-226.
- VENZKE, Carla Denize et al. 2018b. Increasing water recovery rate of membrane hybrid process on the petrochemical wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 117, p. 152-158.