

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

APLICAÇÃO DE BIORREATORES ANAERÓBIOS DE MEMBRANA NO TRATAMENTO BIOLÓGICO DA ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ÁGUA DE REUSO

AUTORES:

Rennio Felix de Sena^{1,2,4,*}, Camilla Eduarda Dias Marinho², Renata Martins Braga³,
Fabíola Dias da Silva Curbelo^{1, 2}, Gilson Barbosa Athayde Jr.⁴

*e-mail do autor correspondente: rennio@ct.ufpb.br

INSTITUIÇÃO:

¹Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba

²Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba

³Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte,

⁴Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba

APLICAÇÃO DE BIORREATORES ANAERÓBIOS DE MEMBRANA NO TRATAMENTO BIOLÓGICO DA ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ÁGUA DE REUSO

Resumo

Os biorreatores anaeróbios de membrana (AnMBR) são tecnologias de tratamento de efluentes que combinam o tratamento biológico anaeróbio com a filtração por membranas. Os AnMBRs desempenham um eficiente papel no tratamento de efluentes industriais devido à baixa necessidade de energia e nutrientes, baixa produção de lodo e potencial de produção de biogás para geração de energia. Diversos fatores influenciam na eficiência deste processo, principalmente pH, temperatura e carga orgânica. O pH deve ser rigorosamente controlado durante o processo entre 6,4 e 7,0, para favorecer as bactérias acetogênicas, acidogênicas, e as arqueas metanogênicas que convertem acetato e hidrogênio a metano e dióxido de carbono. A faixa de temperatura ótima deste processo anaeróbio varia entre 25 °C e 35 °C, o que torna esta tecnologia promissora em quase todo o território brasileiro. O processo de tratamento de esgoto doméstico por AnMBR vem sendo estudado por diversos autores, no entanto, poucos estudos vêm sendo aplicados no tratamento de efluentes industriais. Neste cenário, a água produzida, o principal efluente contaminado por óleo da indústria petrolífera, apresenta diversos desafios de tratamento, devido à sua complexidade química e toxicidade, contendo diferentes compostos orgânicos e inorgânicos, entre eles, elevados teores de sais, óleos dissolvidos, metais pesados e substâncias tóxicas dissolvidas como fenóis e HPAs. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo principal a aplicação de um AnMBR de ultrafiltração no tratamento de água produzida de petróleo, com a finalidade de remover e/ou oxidar e/ou adsorver contaminantes orgânicos específicos, dentre eles óleos dissolvidos e outros poluentes orgânicos. A remoção de matéria orgânica e de contaminantes específicos foram analisados por métodos espectrofotométricos e cromatográficos, onde os parâmetros principais do processo (pH, razão C:N:P, carga orgânica e temperatura) foram rigorosamente controlados para elevar a geração de biogás pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica. O processo proposto neste trabalho se baseou na combinação da digestão anaeróbia da água produzida e esgoto com a separação por membrana visando aumentar a qualidade do efluente final tratado, possibilitando o reuso de água, produção de biogás (metano), redução da demanda energética do processo de tratamento, além da recuperação de nutrientes. Valores típicos de produção de biometano a partir da DQO consumida durante o processo anaeróbio variaram entre 0,25-0,35 m³ CH₄/ kg DQO, cuja composição média do biogás analisado por GC-FID variou entre 35-74% de CH₄, através da remoção média de matéria orgânica (DQO) entre 74-98 % pelo AnMBR.

Palavras-chave: água produzida, AnMBR, biogás, matéria orgânica.

Abstract

Anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) are wastewater treatment technologies that combine anaerobic biological treatment with membrane filtration. AnMBRs play an efficient role in the treatment of industrial effluents due to the low energy and nutrient requirements of their biological process, low sludge production and potential production of biogas that can be used for energy generation. Several factors influence the efficiency of this process, mainly pH, temperature and organic load. The pH must be strictly controlled during the process between 6.4 and 7.0, to favor acetogenic and acidogenic bacteria, and methanogenic archaea that convert acetate and hydrogen to methane and carbon dioxide. The optimum temperature range for this anaerobic process varies between 25 °C and 35 °C, which makes this technology promising in almost the entire Brazilian territory. The domestic sewage

treatment process using AnMBR has been studied by several authors, however, few studies have been applied to the treatment of industrial effluents. In this scenario, produced water, the main effluent contaminated by oil from the oil industry, presents several treatment challenges, due to the chemical complexity and toxicity of these effluents, containing different organic and inorganic compounds, including high levels of salts, dissolved oils, heavy metals and dissolved toxic substances such as phenols and PAHs. Therefore, this work had as main objective the application of an ultrafiltration AnMBR in the treatment of water produced from petroleum, with the purpose of removing and/or oxidizing and/or adsorb specific organic contaminants, including dissolved oils, phenolic compounds and other organic pollutants. The removal of organic matter and specific contaminants were analyzed using spectrophotometric and chromatographic methods, where the main process parameters (pH, C:N:P ratio, organic load and temperature) were rigorously controlled to increase the generation of biogas by the anaerobic decomposition of organic matter. The process proposed in this work was based on the combination of anaerobic digestion of water produced from oil and sewage with separation by an ultrafiltration membrane aiming to increase the quality of the final treated effluent, enabling the reuse of water, production of biogas (methane), reduction of energy demand of the treatment process, in addition to nutrient recovery. Typical values of biomethane production from the COD consumed during the anaerobic process varied between 0.25-0.35 m³ CH₄/ kg COD, whose average composition of the biogas analyzed by GC-FID varied between 35-74% CH₄, through of average removal of organic matter (COD) between 74-98% by AnMBR.

Keywords: produced water, AnMBR, biogas, organic matter

Introdução

O tratamento anaeróbio de águas residuais tem se destacado como uma solução promissora, especialmente através de biorreatores anaeróbios de membrana (AnMBR, sigla para *Anaerobic Membrane Bioreactor*). Essa tecnologia combina benefícios importantes como o tratamento biológico anaeróbio com a filtração por membranas, a produção de biogás e uma reduzida geração de lodo, ao mesmo tempo que as membranas garantem a retenção total de sólidos, resultando em um efluente de alta qualidade [1].

O tratamento da água produzida (AP), efluente resultante em grande volume durante a extração e refino de petróleo, representa um desafio ambiental significativo para a indústria petrolífera. Este efluente é caracterizado por uma complexa mistura de compostos orgânicos e inorgânicos, incluindo óleos dissolvidos, metais pesados, compostos fenólicos e elevadas concentrações de sais [2][3]. Uma abordagem tecnológica promissora para o tratamento da AP é o uso de AnMBR, que proporcionam várias vantagens como baixo consumo energético além da geração de biogás para produção de energia [4][5]. Fatores críticos como pH, temperatura e carga orgânica devem ser estritamente controlados para maximizar a eficiência do processo [5].

Apesar dos avanços no tratamento de esgoto doméstico utilizando AnMBR, há uma lacuna substancial na aplicação dessa tecnologia para o tratamento de efluentes industriais, especialmente a água produzida pela indústria petrolífera [2][6]. Nesse contexto, este estudo investigou a implementação de um AnMBR com membrana de ultrafiltração para o tratamento da AP, visando a remoção de contaminantes orgânicos específicos como óleos dissolvidos, e outros poluentes, que foram caracterizados aqui como material orgânico (DQO, DBO e COT). O processo proposto tem como objetivo melhorar a qualidade do efluente final, viabilizar o reuso da água e produzir biogás (metano) e recuperar nutrientes [5][6].

Metodologia

Configuração do Sistema AnMBR

O sistema AnMBR empregado neste estudo foi constituído por um reator anaeróbio integrado a um módulo de membrana, composto por uma membrana submersa do tipo placa plana de ultrafiltração, modo de filtração tangencial contínuo, com área de 0,08 m² e com diâmetros de poros que variam entre 0,03 a 0,1 µm, uma bomba peristáltica e dois tanques, um para a alimentação e outro para o permeado. Na primeira etapa, o reator foi alimentado com esgoto como efluente. Posteriormente, na segunda etapa, a água produzida do petróleo (AP) foi utilizada como efluente para alimentação no sistema AnMBR. O biorreator possui um volume total de 12 L, volume útil de 11 L, e um *headspace* de 1L para o conteúdo de biogás, que seguia por tubos de PVC até as *bags* de armazenamento.

O AnMBR operou em regime contínuo, com um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 5 dias, tempo de detenção de lodo (TRL) de 15 dias, operando em um fluxo (em LMH) entre 4,25 à 6,25 L/m²/h, com regime de alimentação de efluente e permeação diários de 4-6 horas com volumes de 2 L para ambos, mantendo assim, o volume útil do AnMBR estável em aproximadamente 11 L, com temperatura controlada entre 32-35°C. O pH do reator anaeróbio foi ajustado entre 6,4 e 7,0, quando necessário. A relação DQO:N:P foi ajustada para aproximadamente 100:5:1 por meio da suplementação com nutrientes, quando necessário [4][6]. A concentração de sólidos suspensos na forma de MLSS foi mantida entre 21-25 g/L no biorreator, e a carga orgânica volumétrica mantida entre 100-250 g/L.d.

Alimentação e Condições de Operação do AnMBR

A água produzida do petróleo (AP), utilizada como alimentação para o sistema AnMBR, foi coletada no Polo Potiguar, no município de Guamaré, onde a Petrobrás beneficia o óleo oriundo dos campos marítimos de Ubarana e Agulha. Essa AP foi acidificada até pH 2,0 para manter o óleo em solução e mantida sob refrigeração até ser analisada em laboratório. Antes da alimentação, passou por um pré-tratamento de separação gravitacional para remoção de óleos e graxas em suspensão, e posteriormente, foi utilizada em uma mistura com esgoto doméstico (oriundo de uma ETE de João Pessoa/PB), com composição da mistura de 20% de AP e 80% de esgoto doméstico (Esgoto/AP). A operação inicial concentrou-se na avaliação do desempenho do AnMBR utilizando esgoto doméstico como efluente, onde o reator demonstrou eficácia ao longo de mais de um ano de operação contínua. Posteriormente, o foco da investigação foi direcionado para o tratamento específico da mistura Esgoto/AP.

Análises

Amostras tanto do efluente quanto do permeado do sistema AnMBR foram coletadas periodicamente para análise dos seguintes parâmetros: DQO, DBO, TOG, pH, Turbidez, Condutividade, SST, COT, nitrato (NO₃), nitrogênio total, fósforo total, produção (%vol.) e composição do biogás (GC-FID e Analisador Portátil). O método desenvolvido para analisar a produção e a qualidade do biogás, embora inovador e não amplamente difundido, demonstrou resultados comparáveis aos obtidos por cromatografia (*no prelo*). Esta abordagem alternativa seguiu a metodologia de coleta e análise sugerida por ARRHENIUS et al. [7]. O sistema analítico é composto por um analisador de vazamento de gás portátil (sensor por combustão catalítica, determinações em parte por milhão (faixa de 0 - 50.000ppm) e limite inferior de inflamabilidade %LEL (0% - 100%, calibrado para CH₄). Posteriormente, quando comparado com o método de cromatografia utilizado como referência, esse método se mostrou igualmente eficaz na determinação da composição e do potencial energético do biogás gerado. As análises de referência foram realizadas utilizando um cromatógrafo gasoso (GC-2014, Shimadzu), com injeções no modo split (1:100) a 240 °C, utilizando hélio como gás de arraste a 1,42 mL/min. A coluna GS-GASPRO capilar (30 m x 0,32 mm) foi mantida a 90 °C em modo isotérmico, com detecção por ionização de chama (FID) a 250 °C.

Resultados e Discussão

Caracterização dos Efluentes

Inicialmente, foram realizadas as análises para caracterizar os efluentes usados no sistema, que correspondem ao esgoto e a água produzida do petróleo (AP). Os principais parâmetros analisados e seus respectivos valores são mostrados na Tabela 2. Especificamente para a AP, os parâmetros foram analisados na massa líquida da mesma, após a separação do sobrenadante (fração imiscível).

Tabela 2: Parâmetros físico-químicos do esgoto doméstico e da água produzida de petróleo

	Esgoto Doméstico	Água Produzida (AP)
pH	7,3	7,5
Condutividade, $\mu\text{S/cm}$	853	2410
Turbidez, uT	131	627
TSS, mg/L	160	<10
DQO, mg/L	460	1266
DBO, mg/L	280	745
TOC, mg/L	218	615
NO_3 , mg/L	<1,0	<1,0
N_{total} , mg/L	31,0	2,1
P_{total} , mg/L	10,0	1,0
TOG, mg/L	46,3	670,6

Os resultados obtidos pela caracterização dos efluentes mostraram-se adequados para aplicação no processo de tratamento biológico da AP utilizando AnMBR, conforme abordado no escopo do estudo. É possível observar que o esgoto doméstico apresenta caracterização físico-química comum a este tipo de efluente, sendo essencialmente orgânico e de fácil degradação (razão DBO/DQO $\sim 0,61$, i.e., maior do que 0,4). Por outro lado, a AP apresenta elevado conteúdo orgânico (em termos de TOG, DQO, DBO e COT), embora de fácil degradação (razão DBO/DQO $\sim 0,58$, similar à do esgoto doméstico), e baixo conteúdo de N e P, o que em algumas situações, pode comprometer a eficiência de processos biológicos.

Desempenho do biorreator AnMBR

A partir da caracterização dos efluentes, procedeu-se à avaliação do AnMBR tratando Esgoto na primeira fase, que durou 40 dias, e na fase seguinte, com duração de 30 dias, foi avaliado o tratamento da mistura de Esgoto/AP. O foco principal foi a remoção de matéria orgânica e a avaliação da eficiência do processo para os diferentes efluentes. A seguir, a Tabela 3 apresentadas os respectivos resultados dos parâmetros analisados para avaliar a eficiência de remoção do AnMBR.

Tabela 3: Parâmetros físico-químicos do esgoto doméstico (bruto) de alimentação do AnMBR e do permeado do processo (Fase 1, dias 1 a 40).

	Efluente (Esgoto)		Permeado		Remoção %
	Mín - Máx	Média	Mín - Máx	Média	
Turbidez, uT	38 - 319	125,5	0 - 63	5,0	96,0
TSS, mg/L	<10 - 464	168,0	<2,5 - 34,5	8,7	94,8
DQO, mg/L	248 - 1800	452,5	19,8 - 1500	83,0	81,7
DBO, mg/L	40,4 - 1150	216,0	3,8 - 114,0	10,6	95,1
TOC, mg/L	40,8 - 680	156,0	7,3 - 90,0	24,0	84,6
N_{total} , mg/L	31 - 48,9	45,4	33,3 - 49,6	45,2	0,4
P_{total} , mg/L	7,1 - 17,3	9,1	7 - 12,7	8,5	6,6

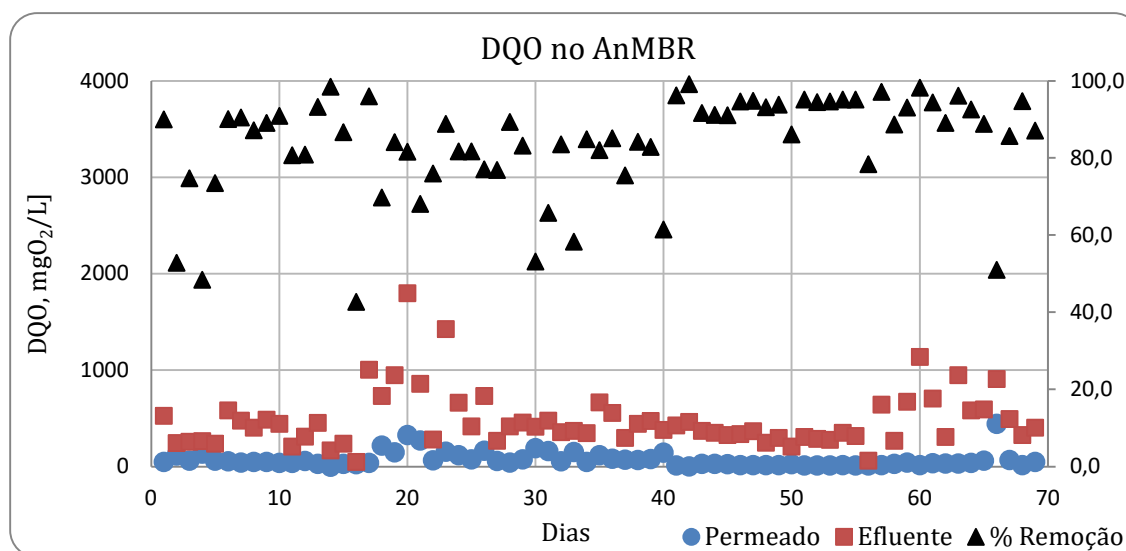
A partir da Tabela 3, observa-se a alta capacidade de remoção de sólidos (TSS e turbidez) do processo AnMBR. Durante o período analisado (dias 1 a 40), o sistema foi alimentado exclusivamente com esgoto doméstico, resultando em condições normais para a remoção de matéria orgânica. A partir do 41º dia, o AnMBR recebeu a mistura Esgoto/AP, e os resultados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros físico-químicos do efluente sintético Esgoto/AP utilizado para alimentação do AnMBR e do permeado do processo (Fase 2, dias 41 a 70)

	Efluente (Esgoto/AP)		Permeado		Remoção %
	Mín - Máx	Média	Mín - Máx	Média	
Turbidez, uT	9 - 145	116,0	1 - 82	19,0	83,6
TSS, mg/L	<10 - 830	190,0	2,9 - 99	7,5	96,0
DQO, mg/L	64 - 1140	355,0	3,5 - 445	19,4	94,5
DBO, mg/L	47 - 425	182,0	<2,5 - 330	27,3	85,0
TOC, mg/L	38 - 305	133,0	<2,5 - 264	20,2	84,8
N _{total} , mg/L	1,2 - 2,0	1,9	1,3 - 3,6	2,1	< 0,1
P _{total} , mg/L	0,1 - 2,9	1,0	0,1 - 2,91	1,03	< 0,1

Em ambas as fases do processo, observou-se uma elevada remoção de matéria orgânica na forma de DQO, DBO e sólidos, atribuída à alta eficiência do processo anaeróbio seguido pela separação por membrana de ultrafiltração no AnMBR. As remoções alcançaram mais de 81% para DQO e DBO (matéria orgânica dissolvida) e acima de 94% para TSS (material em suspensão) em ambas as fases. Como era de se esperar, o processo AnMBR não é projetado para a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo, resultando em baixos índices de remoção desses nutrientes. Entretanto, a biomassa microbiana utiliza esses nutrientes para sua multiplicação celular, desempenhando um papel importante nos processos anaeróbios ao contribuir para a conversão da matéria orgânica dissolvida em metano. A Figura 1 apresenta os resultados de DQO e os respectivos percentuais de remoção do período (70 dias).

Figura 1: Comportamento da DQO do efluente e permeado, e a remoção (%) ao longo do tempo (dias) para o processo por AnMBR.



A remoção de DQO, que é crucial para avaliar a eficiência dos processos biológicos de tratamento de efluentes, apresentou variações ao longo do período, influenciada por diferentes interferentes, como nitrogênio presente no permeado e cloretos, entre outros. A partir 41º dia, conforme mostrado na Fig. 1,

a remoção de DQO tornou-se mais estável e elevada, devido ao início de um controle mais rigoroso do pH (mantido estritamente entre 6,4 e 6,8 dentro do AnMBR) e da carga orgânica adicionada ao biorreator (AP). A contribuição orgânica dessa mistura Esgoto/AP não demonstrou toxicidade aparente (em termos de DBO e material dissolvido presente no permeado) e aumentou significativamente a carga orgânica, promovendo o consumo de material carbonáceo pelas bactérias, o que é fundamental para a digestão anaeróbia e conversão de DQO em metano. Tais resultados demonstraram uma alta eficiência do AnMBR na remoção dos principais poluentes presentes nos efluentes. Os resultados da conversão da DQO em biogás (CH_4 e CO_2) pelo AnMBR pode ser avaliado a partir dos dados da Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros relacionados a produção de biogás (%vol.) pelo AnMBR (total de 70 dias)

	1ª Fase (Esgoto)		2ª Fase (Esgoto/AP)		Referência*
	Mín - Máx	Média	Mín - Máx	Média	
Produção de biogás (L/d)	-	0,38	-	0,36	-
Metano CH_4 , vol. (%)	35,0 – 74,0	57,4	46,3 – 72,9	56,1	45 – 80
Conversão de metano (L CH_4 /gDQO _{remov.} .d)	0,12 – 0,28	0,22	0,09 – 0,23	0,16	0,12 - 0,35
Carga removida (kgDQO/d)	0,39 – 1,59	1,03	0,48 – 0,82	0,71	0,4 – 2,0-

* Velasco et al. [8]

Os resultados referentes à remoção de matéria orgânica (na forma de DQO) dissolvida, convertida em biogás, indicam uma produção média de 0,38 litros de biogás por dia. Na 1ª fase, a conversão de DQO removida em metano foi, em média, 0,22 L CH_4 /g DQO.d, enquanto na 2ª fase foi de 0,16 L CH_4 /g DQO.d, ambas dentro dos padrões estabelecidos e descritos pela literatura [8]. O percentual de metano em volume variou entre 35% e 74%, com médias de 57,4% e 56,1% para a 1ª e 2ª fase, respectivamente. Segundo autores como Ariunbaatar et al. [9] e Shang [10], o percentual de metano no biogás pode variar devido a fatores como temperatura, pH e carga orgânica, sendo esperados maiores percentuais de metano para esgoto doméstico. Embora a água produzida possa apresentar toxicidade devido à sua elevada carga orgânica, cujo conteúdo de óleos e graxas podem compor compostos fenólicos e hidrocarbonetos aromáticos (um ou mais anéis benzênicos), que podem inibir a capacidade das bactérias de metabolizar a matéria orgânica, os resultados deste estudo mostram que, após um período de adequação do sistema anaeróbio com esgoto doméstico (1ª fase), a água produzida (ainda misturada com esgoto) foi biologicamente tratada de maneira eficiente, apresentando uma conversão de DQO em metano similar àquela observada no processo apenas com esgoto, demonstrando uma excelente possibilidade de tratamento deste resíduo e produção de biogás.

Conclusões

A pesquisa demonstrou que o processo por AnMBR foi eficiente tanto para o tratamento de esgoto doméstico quanto para a água produzida do petróleo. O sistema mostrou uma alta capacidade de remoção de matéria orgânica, alcançando remoções superiores a 81% para DQO e DBO, e mais de 94% para TSS, em ambas as fases do estudo. O tratamento de água produzida, mesmo com a presença de compostos potencialmente tóxicos, foi realizado de maneira eficiente após o período de adaptação inicial. A conversão da DQO solúvel em biogás revelou uma produção média de 0,38 litros por dia, com uma produção de metano consistente e dentro dos parâmetros reportados pela literatura. Os resultados sugerem que o processo AnMBR pode ser uma solução viável para a gestão de água produzida na indústria petrolífera, não apenas pela capacidade de tratamento eficaz, mas também pela geração de biogás (fonte de biometano). A estabilidade do processo após ajustes no pH e carga orgânica indica a robustez do sistema em lidar com diferentes tipos de efluentes. Portanto, a aplicação de AnMBR no tratamento de água produzida oferece um caminho promissor para a reuso de águas de processo e produção sustentável de energia, com potencial significativo para ser adotado em larga escala na indústria de petróleo.

Agradecimentos

Os autores agradecem as agências de fomento FAPESQ/PB pelo financiamento (Termo de Outorga nº 3054/2021, Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba - Edital Nº09/2021 Demanda Universal) para recursos de projeto bem como pela concessão de bolsa de mestrado vinculada ao PPgEQ/UFPB, e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão das bolsas de Produtividade em Pesquisa.

Referências Bibliográficas

1. ASLAM, A.; KHAN, S. J.; SHAHZAD, H. M. A. Anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) for municipal wastewater treatment- potential benefits, constraints, and future perspectives: An updated review. **Sci. of the Total Env.**, v. 774, p. 145726, 2021. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145726. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34438128/>. Acesso em: 16 jul. 2024.
2. ALMEIDA, R. et al. Biorreatores com membranas no tratamento de efluentes de refinaria de petróleo: estudo de caso. **Brazilian Journal of Development**, 5(12), 28594-28604, 2019. Doi: 10.34117/bjdv5n12-038. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/5135>. Acesso em: 10 jul. 2024.
3. RIBEIRA-PI, J. et al. Coagulation-flocculation and moving bed biofilm reactor as pre-treatment for water recycling in the petrochemical industry. **Sci. Total Env.** May, 1:715:136800, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136800. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32007876/>. Acesso em: 10 jul. 2024.
4. ARNOLD, T. et al. Development of inspection system for the detection and analysis of solid particles and oil droplets in process water of the petrochemical industry using hyperspectral imaging and fluorescence imaging. **SPIE Defense and Commercial Sensing**, 2022. Doi:10.1117/12.2618760. Acesso em: 10 jul. 2024.
5. SANTOS, A.J.C. et al. Electrochemical treatment of fresh, brine and saline produced water generated by petrochemical industry using Ti/IrO₂-Ta₂O₅ and BDD in flow reactor. **Chemical Engineering Journal**, 233, 47-55, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.08.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138589471301067X>. Acesso em: 10 jul. 2024.
6. SANTOS, A.V. et al. Scale-up of electrochemical oxidation system for treatment of produced water generated by Brazilian petrochemical industry. **Env. Sci. Pollut. Res. Int.**, 21(14):8466-75, 2014. doi: 10.1007/s11356-014-2779-x. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24687787/>. Acesso em: 10 jul. 2024.
7. ARRHENIUS, K., FISCHER, A., BÜKER, O. Methods for sampling biogas and biomethane on adsorbent tubes after collection in gas bags. **Appl. Sci.** 2019, 1171. doi:10.3390/app9061171. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/applsci>. Acesso em: 10 jun. 2023
8. VELASCO, P. et al. Focused review on membrane contactor for the recovery of dissolved methane from anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) effluents. **Chemosphere**. 2021, 130448. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.130448. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/chemosphere>. Acesso em: 10 jun. 2023
9. ARIUNBAATAR, J., et al. Performance of AnMBR in treatment of post-consumer food waste: effect of hydraulic retention time and organic loading rate on biogas production and membrane fouling. **Frontiers in Bioeng. and Biotech.**, 8, 594936, Jan 2021. doi:10.3389/fbioe.2020.594936. Disponível em: <https://www.frontiersin.org>. Acesso em: 10 jun. 2023.
10. SHANG, S. Anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for wastewater treatment. **ACES**, 2014, 4, 56-61. doi:10.4236/aces.2014.41008. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/aces>. Acesso em: 10 jun. 2023.