

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AVALIAÇÃO DE UM BIORREATOR A MEMBRANA DE LEITO MÓVEL NA REMOÇÃO DE NUTRIENTES DE EFLUENTE DA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS

* Guilherme Gavlak¹
Carlos Magno de Sousa Vidal²

EVALUATION OF A MEMBRANE BIOREACTORS WITH A MOVING BED FOR THE REMOVAL OF NUTRIENTS OF THE DAIRY INDUSTRY WASTEWATER

Recibido el 20 de julio de 2021. Aceptado el 7 de enero de 2022

Abstract

The membrane bioreactors are characterized by combining processes of biological degradation and membrane filtration in the same unit, resulting in high efficiencies for effluents treatment. However, the insertion of a moving bed in these systems can further the efficiency, especially in relation to the removal of nutrients such as nitrogen and phosphorus. Due to the high presence of nutrients in the effluent of the dairy industry and the number of environmental problems related to these compounds, the main objective of this study was to evaluate the removal of nutrients, exceptionally nitrogen and phosphate forms, by using a membrane bioreactor with a moving bed. The reactor was built on a pilot scale with 30% of its useful volume filled with support material and operated for a period of 60 days continuously. The sludge age and the hydraulic detention time adopted were 20 days and 20 hours, respectively. The average achieved efficiencies of total Kjeldahl nitrogen and ammonia nitrogen removal were 96 and 98%, respectively, highlighting the advantage of this type of system for removing nitrogenous compounds. In relation to phosphorus removal, for the conditions adopted, the average efficiency was 7.9%, resulting in a low efficiency.

Keywords: membrane bioreactors with moving bed, wastewater, nutrients removal.

¹ Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Ambiental (UNICENTRO), PR, Brasil.

* *Autor correspondente:* Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO), Campus de Irati, Rua Professora Maria Zanon de Almeida s/n, Riozinho, Irati/PR. CEP 84505-677. Brasil. Email: eng.guilhermegavlak@gmail.com

Resumo

Os biorreatores a membrana (BRM) são caracterizados por combinarem os processos de degradação biológica e filtração por membranas em uma mesma unidade, este é responsável pela obtenção de elevadas eficiências no tratamento de efluentes. Entretanto, a inserção de um leito móvel nestes sistemas favorece ainda mais tal eficiência, principalmente em relação à remoção de nutrientes como o nitrogênio e fósforo. Devido a elevada presença de nutrientes no efluente da indústria de laticínios e os diversos problemas ambientais relacionados a estes compostos, o presente estudo tem como objetivo principal avaliar a remoção destes, excepcionalmente as formas nitrogenadas e fosfatadas por meio de um biorreator a membrana de leito móvel misto. O reator foi construído em escala piloto com 30% do seu volume útil preenchido com material suporte e operado por um período de 60 dias de forma contínua. A idade do lodo e o tempo de detenção hidráulica adotados foram de 20 dias e 20 horas, respectivamente. As eficiências médias de remoção de nitrogênio total Kjeldahl e nitrogênio amoniacal alcançadas foram de 96 e 98%, respectivamente, enaltecendo a vantagem deste tipo de sistema visando a remoção destes compostos nitrogenados. Em relação à remoção de fósforo, observou-se baixo rendimento para as condições adotadas, atingindo eficiência média de 7.9%.

Palavras chave: biorreator a membrana de leito móvel, efluentes industriais, remoção de nutrientes.

Introdução

Dentre as principais indústrias brasileiras, encontram-se as do ramo de laticínios, essas são responsáveis por contribuir para o crescimento do produto interno bruto do país e no desenvolvimento do mesmo, visto que em 2020, o Brasil foi considerado o sexto maior produtor de leite no mundo (Formigoni, 2020). Assim como grande parte das indústrias, os laticínios consomem grandes quantidades de água em seu processo produtivo e nas limpezas dos maquinários e pisos das fábricas. A partir da vasta utilização de água, são gerados também grandes volumes de efluentes líquidos, os quais são considerados de grande potencial poluidor principalmente em razão das elevadas concentrações de nutrientes, como no caso das diferentes formas de nitrogênio e fósforo e de material orgânico. Esses efluentes quando lançados em corpos hídricos, são capazes de causar grandes desequilíbrios ambientais, tanto para biodiversidade quanto para o meio físico em questão, sendo que a presença destes compostos pode favorecer ainda mais tais impactos, como por exemplo, a eutrofização destes locais.

O tratamento deste tipo de efluente, é comumente realizado por meio de sistemas de sedimentação dos sólidos e separação do material gorduroso, assim como, da degradação biológica da matéria orgânica presente, como por exemplo, pelos sistemas de lodos ativados. Porém, devido a elevada presença de matéria orgânica e óleos e graxas, diversos problemas operacionais são relatados nestes tipos de tratamento, como por exemplo a incrustação do sistema e a baixa sedimentabilidade dos sólidos.

Com o intuito de obter um efluente tratado de melhor qualidade e suprir as desvantagens dos sistemas convencionais, a implantação de biorreatores a membrana (BRM) vem sendo cada vez

mais empregada. Na atualidade, os BRM demonstram ser uma tecnologia mais promissora que os lodos ativados convencionais, se destacando em relação remoção de nutrientes dos esgotos, especialmente nitrogênio e fósforo (Brown *et al.*, 2011). Portanto, a implantação destes sistemas objetivando a remoção biológica desses compostos são comumente encontrados (Kim *et al.*, 2008). Os BRM operam de maneira similar aos sistemas de lodos ativados convencionais, porém, faz-se o uso de membranas de filtração, dispensando a necessidade de decantadores secundários na etapa de separação das fases sólido/líquida (Iorhemen *et al.*, 2016; Judd e Judd, 2006). As membranas utilizadas podem ser de micro, ultra ou nano filtração. Esse processo funciona, portanto, como um tratamento avançado, servindo como um polimento do efluente. Nesse sistema, consegue-se reter dentro do reator a totalidade os sólidos em suspensão, bactérias e demais microrganismos presentes no efluente, o que garante segurança microbiológica no efluente tratado (Provenzi, 2005).

Com o objetivo aumentar a concentração de biomassa nesses sistemas, pode ser feita a inserção de um leito móvel, isso favorece a formação de zonas anaeróbias e anóxicas no meio e beneficia o desenvolvimento de biofilme aderido nesse material suporte, originando o chamado *Moving Bed Biofilm Reactors* (MBBR), o qual é caracterizado pela presença de biomassa aderida e em suspensão no mesmo reator. O biofilme originado, é composto principalmente de microrganismos que possuem crescimento lento, isso acontece devido a retenção destas peças no reator por longos períodos e estes são responsáveis pela degradação de material orgânico e também pelos processos de nitrificação e desnitrificação (Fujii, *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2006). A implantação destes sistemas visando a remoção de nutrientes, principalmente nitrogênio, é de suma importância uma vez que os mesmos são responsáveis por obter elevadas eficiências na remoção de tal parâmetro.

Porém, nos dias atuais, são poucos os exemplares de estudos de tratabilidade visando a remoção de nutrientes do efluente da indústria de laticínios, ainda mais quando se refere a utilização de biorreatores a membrana de leito móvel para este propósito. Portanto, o presente estudo busca avaliar a remoção de nutrientes, excepcionalmente, compostos nitrogenados e fosfatados do efluente da indústria de laticínios, por meio da utilização de um biorreator a membrana de leito móvel misto.

Procedimento Experimental

O efluente utilizado é proveniente de uma indústria de laticínios localizada na região sul do Brasil, no estado do Paraná, a qual tem como produto a fabricação de queijos e derivados, sendo oriundo dos processos de fabricação da indústria e de lavagem de maquinários e pisos. O efluente foi coletado após um tratamento inicial por caixa de gordura, flotação e lagoa de decantação, onde grande parte dos sólidos e óleos e graxas são removidos. Eram coletados 500 litros semanalmente para alimentação do sistema.

A biomassa foi coletada na lagoa aeróbia do próprio sistema de tratamento da indústria a qual cedeu o efluente, sendo disposta num reservatório para que houvesse a sedimentação dos sólidos presentes e conseqüentemente, obtivesse uma biomassa mais concentrada com um teor de sólidos suspensos totais igual a 8 g/L. Após esse período, o reator passou por um processo de aclimatação até que a estabilização da concentração de sólidos suspensos totais fosse atingida, o qual demorou cerca de 30 dias, resultando num teor de 5 g/L.

Características da unidade experimental

O sistema de biorreator a membrana foi composto por um tanque retangular com volume total e útil de 60 e 57 litros, respectivamente. Uma bomba peristáltica era responsável pelo processo de filtração, juntamente com um módulo de membranas submerso da marca Koch Membrane Systems®, do tipo fibra oca, com material poliéster, poro nominal de $0.03\mu\text{m}$ e diâmetro externo de fibra de 2.6mm, com uma área de filtração de 0.5m^2 e uma taxa de fluxo de permeado variando de 5 a 15 L/h. O módulo da membrana era acoplado a um vacuômetro com fins de aferir a pressão necessária para que houvesse a filtração. A vazão de entrada do efluente era regulada por meio de uma boia de nível à medida que o processo de filtração e o descarte do lodo fossem realizados, mantendo o sistema contínuo. A aeração foi fornecida por um compressor de ar, com vazões no reator e no módulo de membranas de 0.48 e $1.5\text{m}^3/\text{h}$ respectivamente, resultando numa taxa de aeração da membrana de $3\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, mantendo o reator totalmente aeróbio. Uma placa de arduíno foi utilizada para que houvesse uma automatização do sistema. A representação esquemática do sistema pode ser verificada na Figura 1.

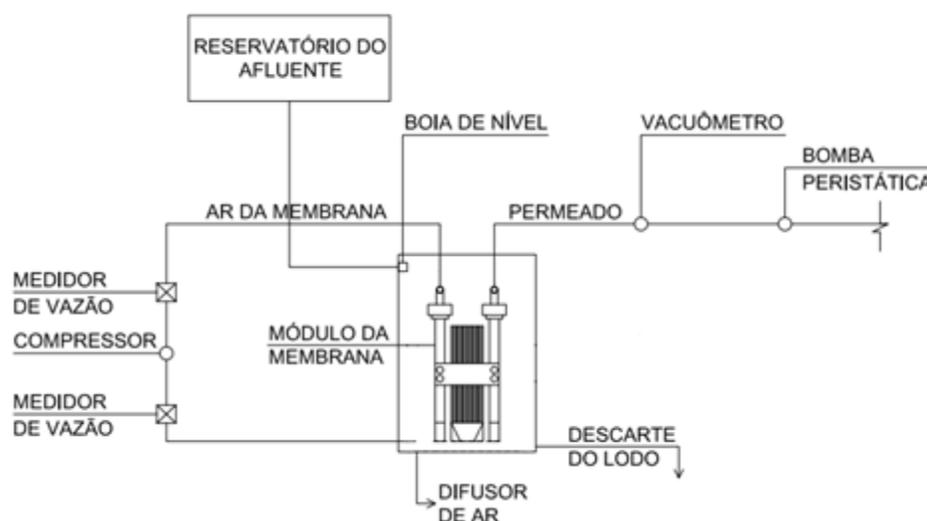


Figura 1. Representação esquemática do biorreator a membrana utilizado. Fonte: Adaptado de Orth, 2020.

Com fins de aumentar a concentração de biomassa no reator, assim como, favorecer a criação de diferentes zonas (anaeróbicas e anóxicas) no mesmo, fez-se a inserção de 30% do volume útil do reator, seguindo recomendações de Rusten *et al.* (2006) e Yang *et al.* (2009), de um leito móvel misto composto por dois tipos de material suporte, sendo 15% deste volume de cada tipo de material. Adotou-se um leito móvel misto contendo dois tipos de material suporte devido à escassez de estudos sobre tal temática, com o intuito de inovar e obter conhecimento sobre a velocidade de crescimento em ambos os materiais utilizados. As características dos dois tipos de material suporte utilizados para compor o leito móvel estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos tipos de materiais suporte utilizados.

Tipo	Marca	Material	Área superficial	Diâmetro
1	Alfa BioMídia	Polipropileno	700m ² /m ³	30mm
2	AMB BioMídia TM	Polietileno	550m ² /m ³	15mm

Para a determinação da velocidade de crescimento dos microrganismos aderidos nos dois tipos de material suporte utilizados, aplicou-se o método utilizado por Costa (2018). Para tal metodologia, eram coletadas 5 peças de cada tipo de material suporte e alocadas em recipientes contendo 25 ml de água destilada, cada tipo em seu respectivo frasco, para que posteriormente fossem feitas a agitação das mesmas e a raspagem do material aderido com o auxílio de uma pinça. Após esses procedimentos, o meio líquido era filtrado e posteriormente realizado as análises de sólidos suspensos voláteis (SSV), os quais indicam a concentração de biomassa presente. Para a realização do cálculo da velocidade do crescimento dos microrganismos, dividiu-se a concentração de SSV obtida no final da operação do sistema menos a inicial pelo número de dias de operação, conforme apresentado na Equação 1.

$$\frac{SSV_f - SSV_i}{t_f - t_i} = v$$

Equação (1)

Onde:

v: velocidade de crescimento bacteriano (gSSV/L.d)

SSV_f: Concentração final de sólidos suspensos voláteis no material suporte (g/L)

SSV_i: Concentração inicial de sólidos suspensos voláteis no material suporte (g/L)

T_f: tempo final (dias)

T_i: Tempo inicial (dias)

A fim de evitar oscilações na temperatura do meio e a interferência desta nos resultados obtidos, o sistema foi operado em ambiente fechado com controle de temperatura realizado por meio de um ar-condicionado.

Operação do sistema

O biorreator a membrana de leito móvel misto foi operado em fluxo contínuo, porém, com filtração intermitente, 8 minutos realizando a filtração e 1 minuto com a bomba peristáltica desligada para relaxamento da membrana (Judd, 2006; Wu *et al.*, 2008). Esse tipo de operação adotada, tem a finalidade de permitir o arraste dos sólidos aderidos as paredes da membrana pelas bolhas de ar provenientes dos aeradores, desacelerando assim o processo de colmatação. Além disso, o sistema de tratamento proposto foi operado a partir das condições operacionais apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Condições operacionais do biorreator a membrana de leito móvel misto.

Condições Operacionais	Valores adotados
Idade do lodo	20 dias
Tempo de detenção hidráulica (TDH)	20 horas
Vazão do permeado	47.5 ml/min
Tipo de alimentação	Contínua
Tempo de operação do sistema	60 dias

A idade do lodo adotada, ou seja, o tempo necessário de permanência da biomassa (sólidos) dentro do biorreator, encontra-se dentro do valor recomendado por Meng *et al.* (2009), onde ao realizarem um levantamento bibliográfico sobre o tema, obtiveram informações de que as melhores idades de lodo estão entre 20 e 50 dias. O tempo de detenção hidráulica de 20 horas utilizado, teve como base a grande quantidade de estudos realizados utilizando valores de TDH variando de 10 a 40 horas (Giwa *et al.*, 2015; Rivas *et al.*, 2016; Belli *et al.*, 2017) e o tempo de operação do sistema de 60 dias é resultado da multiplicação da idade do lodo vezes três.

Monitoramento do sistema

Para obter uma análise completa da eficiência do sistema de tratamento, amostras de três pontos diferentes foram coletadas, sendo no reservatório de alimentação, ou seja, o efluente bruto, no tanque de aeração e no reservatório do permeado, após o tratamento proposto. Após a realização das coletas das amostras, eram realizadas as análises apresentadas na Tabela 3 em seus determinados pontos, seguindo as metodologias indicadas no Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater Ed. 23rd (APHA, 2017) e realizadas em triplicatas, para que fosse possível avaliar a eficiência do tratamento em questão.

As amostras coletadas no tanque de aeração foram previamente filtradas em membranas de 0.45 µm para que posteriormente fossem realizadas as análises de fósforo total e nitrogênio amoniacal.

Com a finalidade de obter um maior conhecimento da atividade biológica da biomassa presente no reator e determinar a taxa de consumo de oxigênio específica (TCOesp.) pelas bactérias a partir do decaimento do oxigênio dissolvido no meio, realizou-se também ensaios respirométricos seguindo a metodologia descrita por Ochoa *et al.* (2002) e Wolff *et al.* (2003).

Tabela 3. Análises realizadas em seus respectivos pontos.

Pontos de coleta	Análises realizadas
Reservatório de alimentação	Fósforo total (P-PO ₄ ³⁻), nitrogênio amoniacal (N-NH ₃), nitrogênio total Kjeldhal (NTK)
Tanque de aeração	Sólidos suspensos totais (SST), fixos (SSF) e voláteis (SSV), temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD), pressão transmembrana (PTM), fósforo total (P-PO ₄ ³⁻), nitrogênio amoniacal (N-NH ₃)
Reservatório do permeado	Fósforo total (P-PO ₄ ³⁻), nitrogênio amoniacal (N-NH ₃), nitrogênio total Kjeldhal (NTK)

Periodicidade das análises de monitoramento

Com o intuito de obter o comportamento da atividade da biomassa do reator, era realizada a aferição do oxigênio dissolvido diariamente, assim como, executada a análise respirométrica duas vezes durante o período de operação do sistema, sendo no início e no final do experimento. A temperatura do licor misto e a pressão transmembrana foram monitoradas diariamente, já as análises de sólidos suspensos totais, fixos e voláteis, nitrogênio total Kjeldahl, nitrogênio amoniacal e fósforo total eram realizadas duas vezes na semana durante o período de operação do sistema.

Resultados e discussão

Caracterização do efluente

As concentrações dos parâmetros utilizados para caracterização do efluente da indústria de laticínios estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização do efluente oriundo da indústria de laticínios.

Parâmetro	Valor médio
Demanda química de oxigênio solúvel (DQOs) (mg/L)	1045.3 ± 160.21
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (mg/L)	840.85 ± 130.11
Nitrogênio total Kjeldahl (mg/L)	104.575 ± 5.43
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	51.7 ± 7.27
P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	2.84 ± 0.47

Ao analisar a Tabela 4, verifica-se altos valores nas concentrações de demanda química de oxigênio solúvel e de demanda bioquímica de oxigênio, conseqüentemente, denota-se que o efluente da indústria de laticínios possui um elevado potencial poluidor e pode ser responsável por diversos impactos ambientais, principalmente nos recursos hídricos. Ao calcular a razão DQOs/DBO, o valor encontrado localiza-se abaixo de 2,5, portanto, segundo Von Sperling (2009), quando obtido valores inferiores a tal, considera-se que há notáveis concentrações de material orgânico biodegradável, o que favorece os processos de tratamento biológicos.

Os efluentes líquidos gerados neste tipo de indústria são caracterizados por possuírem elevadas concentrações de nutrientes, principalmente de nitrogênio em suas diferentes formas. Mesmo que a presença desses nutrientes seja indispensável para um bom funcionamento das estações biológicas de tratamento de efluentes, quando mal gerenciados, efluentes contendo grandes concentrações destes compostos, são causadores de diversos impactos ambientais ao serem lançados em corpos hídricos receptores, se destacando a eutrofização, assim como, a proliferação de algas e anaerobiose dos mesmos (Brum *et al.*, 2009). A legislação brasileira a qual regulamenta os padrões de lançamento de efluentes (Resolução CONAMA 430/2011), impõem o limite máximo de 20 mg/L para a concentração de nitrogênio amoniacal a ser disposta em corpos hídricos, portanto, a concentração presente no efluente estudado encontra-se muito a cima do permitido.

Monitoramento do biorreator a membrana de leito móvel

O sistema operado teve seu tanque de aeração (licor misto) monitorado no decorrer da operação por meio das análises de sólidos em suspensão, da aferição da temperatura e do oxigênio dissolvido no licor misto, assim como da pressão transmembrana. Com a finalidade de avaliar a eficiência do tratamento proposto, monitorou-se também as concentrações de nitrogênio total Kjeldahl e amoniacal, de fósforo total nos três pontos de amostragem e os resultados deste monitoramento estão dispostos a seguir:

Sólidos suspensos no licor misto

O comportamento das concentrações de sólidos suspensos totais (SST), fixos (STF) e voláteis (STV) durante o período de operação do sistema está disposto na Figura 2.

Ao analisar os valores obtidos, nota-se pouca oscilação entre as concentrações, o que indica uma boa estabilização do reator biológico em termos de crescimento da biomassa em suspensão. Os elevados teores de sólidos em suspensão encontrados no reator são uma das vantagens da utilização do sistema de biorreatores a membrana, tendo em vista que a filtração por membranas faz com que a maior parte da biomassa fique retida no tanque, favorecendo os processos de degradação e assimilação biológica.

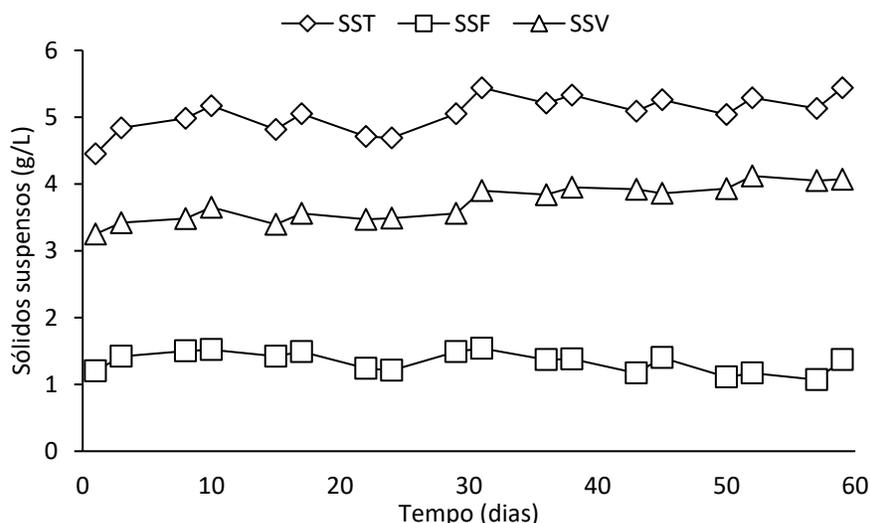


Figura 2. Comportamento dos sólidos em suspensão no licor misto no decorrer do período de operação do sistema.

A concentração média de sólidos suspensos totais obtida no decorrer da operação do sistema foi de 5.07 ± 0.27 g/L, enquanto as de sólidos suspensos fixos e voláteis foram 1.37 ± 0.15 e 3.74 ± 0.26 g/L, respectivamente. As concentrações obtidas mostram-se de grande significância, tendo em vista que segundo Jordão e Pessoa (2011), estas estão associadas a quantidade de microrganismos responsáveis pelos processos de degradação biológica. Diversas pesquisas são desenvolvidas com concentrações distintas de sólidos suspensos em biorreatores a membrana, como por exemplo nos estudos de Rosenberger e Kraume (2002), os quais operaram o sistema com concentrações entre 2 e 24 g/L e Ujang, Salim e Khor (2002), onde essa concentração foi entre 2.5 e 3.8 g/L.

Crescimento microbiano no leito móvel misto

As concentrações de SSV presentes em ambos os materiais suporte obtidas no decorrer da operação do sistema estão dispostas na Figura 3. Verifica-se grande disparidade na curva de crescimento de concentração de SSV em ambos os materiais utilizados, onde o material suporte do tipo 1 se destaca. Quando se referido ao tipo 1, a velocidade de crescimento microbológico obtida foi de 0.0255 gSSV/L.dia, com uma concentração média de SSV durante o período de operação de 0.868 ± 0.475 g/L, enquanto no tipo 2, a velocidade de crescimento e a concentração de SSV foram inferiores, sendo 0.0123 gSSV/L.dia e 0.416 ± 0.242 g/L, respectivamente. Portanto, ao utilizar um material suporte com maior diâmetro e maior área superficial, o crescimento de biofilme é favorecido.

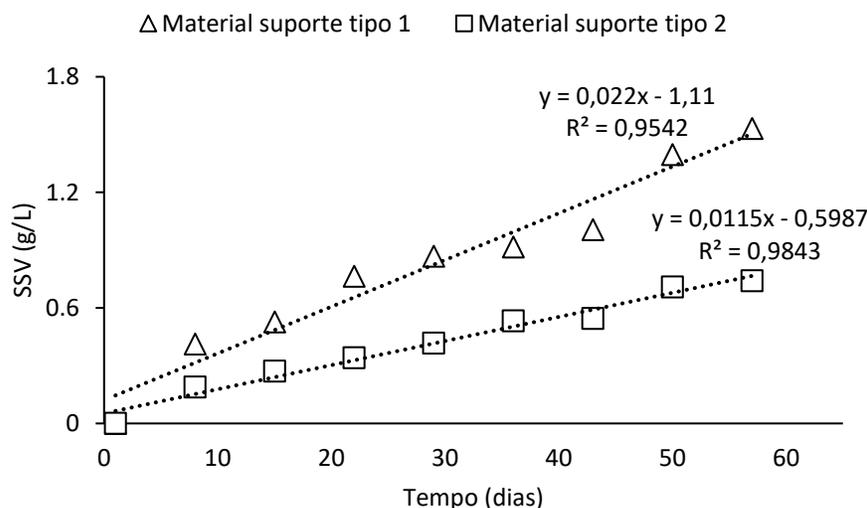


Figura 3. Evolução da concentração dos sólidos suspensos voláteis nos dois tipos de material suporte utilizados no decorrer do período de operação do sistema.

Quando utilizado um material suporte para que haja o crescimento de biomassa aderida no mesmo, acarreta na proliferação de diversos tipos de microrganismos devido as diferentes zonas presentes no meio, sendo elas aeróbicas, anóxicas e anaeróbicas, como por exemplo, a criação bactérias nitrificantes e desnitrificantes. Outro fator importante para o aumento desses microrganismos são os elevados teores de substâncias poluentes, matéria orgânica e nitrogênio amoniacal os quais servem de substrato metabólico para essas bactérias e beneficia o crescimento do biofilme (Fujii *et al.*, 2013). Portanto, os dados apresentados evidenciam uma das vantagens de utilizar o leito móvel num biorreator a membrana, onde pode-se obter uma maior concentração e maior variedade de microrganismos no sistema por meio deste e favorece ainda uma maior remoção de alguns poluentes, como por exemplo, os compostos nitrogenados.

Temperatura

Devido ao fato de sistema ser construído em ambiente fechado e com controle de temperatura, observa-se pouca oscilação nos valores aferidos diariamente no decorrer do período de operação, onde os mesmos estão apresentados na Figura 4. O valor médio da temperatura ao decorrer o período de operação do sistema foi de 27 ± 1.80 °C, o qual se encontrou dentro do considerado ideal por Jordão e Pessoa (2011), onde segundo os autores, o mesmo deve-se encontrar entre 25°C e 35°C, ressaltando que nenhum dos valores aferidos se diferiu desta margem. Segundo Park, *et al.* (2015), a temperatura pode influenciar e alterar o metabolismo dos microrganismos, todavia, este é um parâmetro crucial a ser monitorado em biorreatores a membrana.

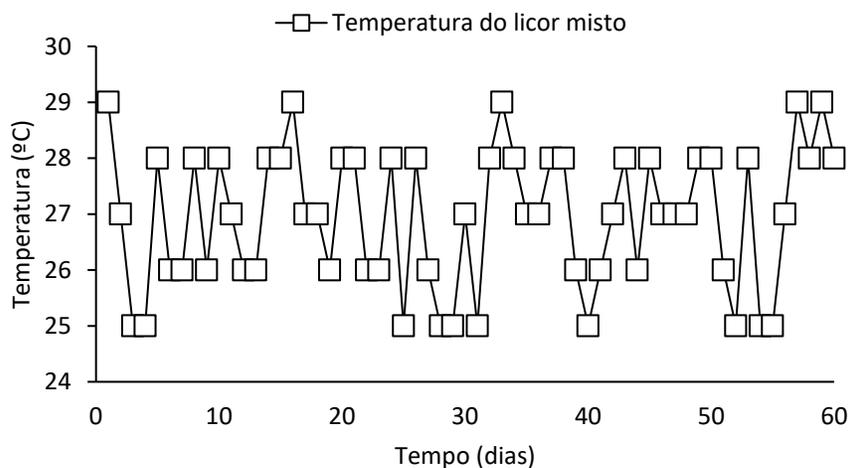


Figura 4. Comportamento da temperatura no licor misto no decorrer do período de operação do sistema.

Oxigênio dissolvido no licor misto

As concentrações diárias de oxigênio dissolvido no licor misto do tanque aeróbio do biorreator a membrana estão dispostas na Figura 5.

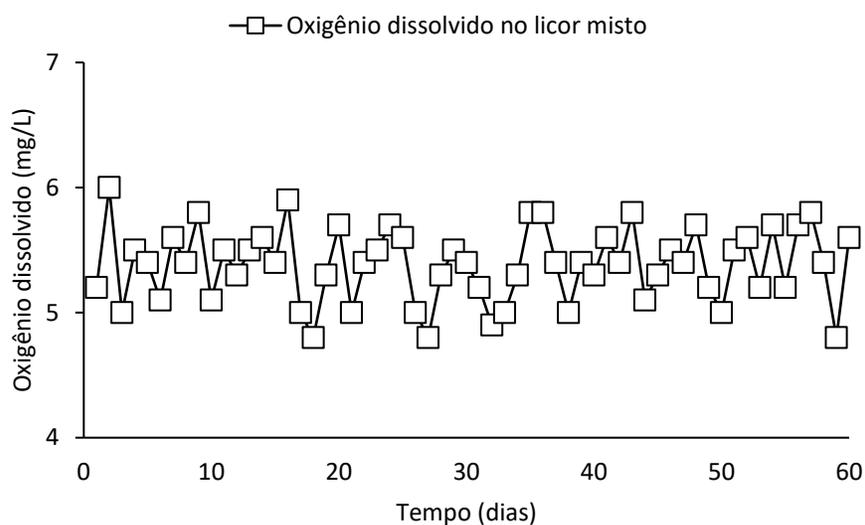


Figura 5. Comportamento do oxigênio dissolvido no licor misto no decorrer do período de operação do sistema.

Ao analisar as concentrações de oxigênio dissolvido diárias, verifica-se uma pequena variação nos valores obtidos, isso se dá possivelmente devido à realização do abastecimento do sistema, tendo em vista que o efluente bruto sofria variação nas suas concentrações de material orgânico e de nutrientes, resultando num maior consumo do oxigênio dissolvido nos processos de degradação em situações de alta. A concentração média de oxigênio dissolvido no licor misto durante a operação do sistema foi de 5.4 ± 0.342 mgO₂/L, estando dentro da margem considerada ideal para biorreatores a membrana a qual não deve ser menor e nem superior a 4 e 6 mgO₂/L, respectivamente (Wagner e Rosenwinkel, 2000; Cicek *et al.*, 2001; Xing *et al.*, 2001).

Pressão transmembrana

Monitorou-se a pressão transmembrana durante o processo de filtração e os valores aferidos diariamente estão expostos na Figura 6.

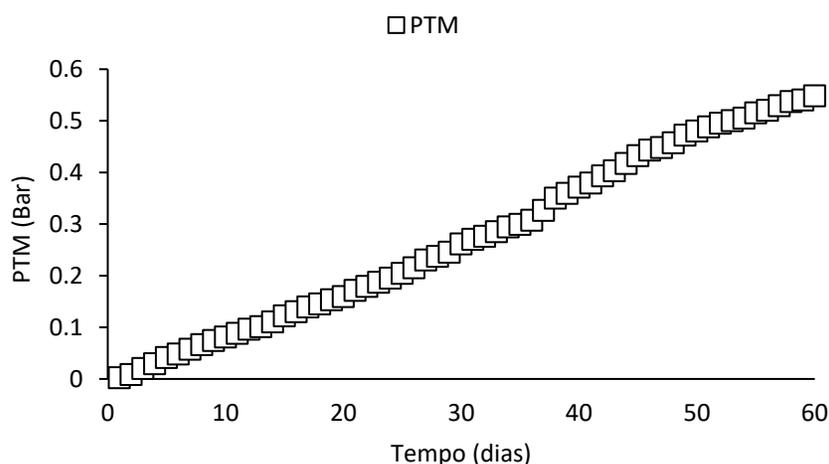


Figura 6. Comportamento da pressão transmembrana no decorrer da operação do sistema.

Nota-se um crescimento nos valores aferidos diariamente de pressão transmembrana, o que indica o aumento da colmatação da membrana de filtração, ou seja, um maior entupimento dos poros da mesma. O aumento no processo de colmatação se dá possivelmente devido ao fato do efluente em estudo possuir elevadas concentrações de óleos e graxas em sua composição, assim como de produtos microbianos solúveis e substâncias poliméricas extracelulares. Porém, ao decorrer do período de operação do sistema, o valor crítico da PTM (0,6 bar) não foi atingido, portanto, não sendo necessário a realização da limpeza da mesma. Adotou-se 0,6 bar como valor crítico para pressão transmembrana seguindo as recomendações do fabricante do módulo de membranas utilizado, assim como, indicado por Zsirai, *et al.* (2012), onde segundo os autores, esse valor não pode ser excedido em processos de filtração por membranas.

Avaliação da eficiência do sistema

Nitrogênio Total Kjeldahl e Nitrogênio Amoniacal

Estão apresentados na Figura 7 os dados obtidos referentes ao nitrogênio total Kjeldahl ao decorrer da operação do biorreator a membrana de leito móvel misto e sua respectiva eficiência na remoção.

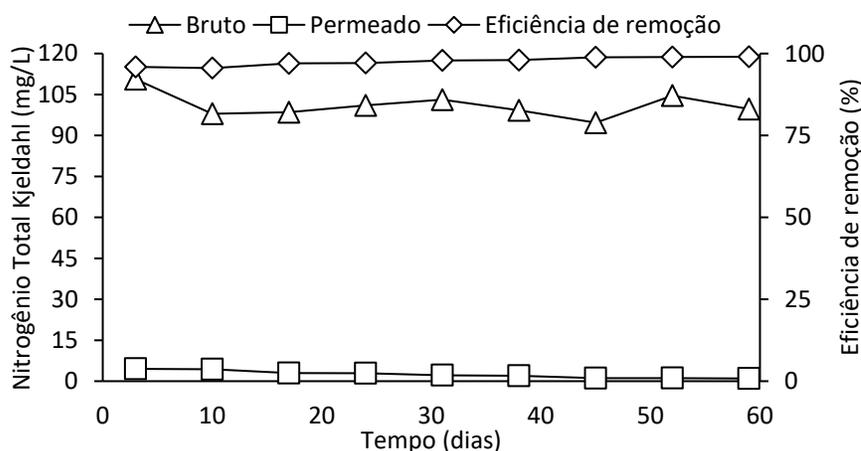


Figura 7. Comportamento das concentrações de nitrogênio total Kjeldahl ao decorrer da operação do sistema e sua eficiência total de remoção.

O efluente bruto no reservatório de alimentação, ou seja, antes do tratamento proposto, possuía uma concentração média de NTK igual a 105.6 ± 6.1 mg/L, a qual foi reduzida em $98 \pm 1.3\%$ a partir do tratamento proposto, resultando numa concentração de 2.18 ± 1.34 mg/L no efluente tratado.

Em relação ao nitrogênio amoniacal, está disposto na Figura 8 o monitoramento do mesmo durante a operação do sistema nos três diferentes pontos analisados. Ao decorrer da operação do sistema, foi verificado uma elevação na eficiência da ação biológica, visto que a mesma aumentou no transcorrer do período estudado, obtendo-se uma eficiência média de remoção de $94 \pm 2.9\%$, reduzindo a concentração média inicial de $N-NH_4^+$ de 50 ± 6 mg/L para 3 ± 1.5 mg/L dentro do tanque. Posteriormente ao 43º dia de análise, a concentração de nitrogênio amoniacal no tanque de aeração foi reduzida na faixa de 1 mg/L a qual permaneceu até o fim da operação do sistema. Em relação a eficiência total do sistema, ou seja, considerando a ação biológica, mais o processo de filtração por membranas, a mesma foi de $96 \pm 2.1\%$, onde a concentração média de $N-NH_4^+$ aferida no permeado, após o tratamento, foi 1.9 ± 1.2 mg/L, podendo destacar que a partir do 43º, a concentração obtida no permeado foi inferior a 1 mg/L.

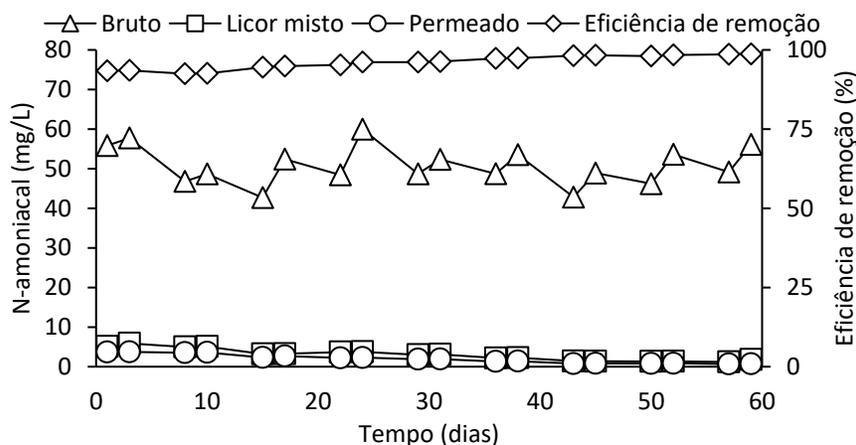


Figura 8. Comportamento das concentrações de nitrogênio amoniacal ao decorrer da operação do sistema e sua eficiência total de remoção.

Durante a operação do biorreator a membrana de leito móvel misto, o efluente tratado atendeu os padrões descritos pela legislação em relação aos padrões de lançamento de efluentes (Resolução CONAMA 430/2011) em função das concentrações de nitrogênio amoniacal. A redução deste parâmetro foi realizada exclusivamente pelo sistema de tratamento e não volatilizada, tendo em vista que em sua maioria, o nitrogênio amoniacal foi apresentado em forma de cátion amônio e não em forma de amônia, isso é comprovado pelos valores de pH no tanque de aeração a qual teve um valor médio de 7.9 ± 0.1 , não sendo superior a 9.25 (Benjamin, 2002). Portanto, a redução das concentrações de nitrogênio amoniacal, assim como, de nitrogênio total Kjeldahl, teve como principal mecanismo responsável para tal, o processo de nitrificação (Belli *et al.*, 2012), tendo em vista que a temperatura onde foi alocado o sistema era controlada a partir de um sistema de ar-condicionado e teve um valor médio de 27°C , estando entre as consideradas ideais para o crescimento de bactérias nitrificantes (Bitton, 2005), assim como, as condições de aeração no reator, as quais também favoreceram para tal processo.

A presença do leito móvel misto contendo formatos irregulares, favoreceu a criação de diferentes zonas no material suporte, sendo elas anaeróbias e anóxicas, o que resultou numa maior diversidade de microrganismos, como por exemplo os responsáveis pelos processos de nitrificação (Kellner, 2014). Estes tipos de microrganismos possuem crescimento lento, portanto, ao decorrer do período de operação, a eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal, assim como, de nitrogênio total Kjeldahl aumentou juntamente com um maior desenvolvimento destes. O aumento da atividade biológica autotrófica da biomassa a partir da presença do leito móvel e favorecimento na remoção das formas de nitrogênio, é uma das principais vantagens deste tipo de sistema (Hem *et al.*, 1994), processo este beneficiado quando utilizado valores de idade do

lodo mais elevados, como na presente pesquisa. A elevada atividade biológica da biomassa citada, é comprovada por meio dos valores médios obtidos nas análises respirométricas do licor misto, os quais estão apresentados na Figura 9.

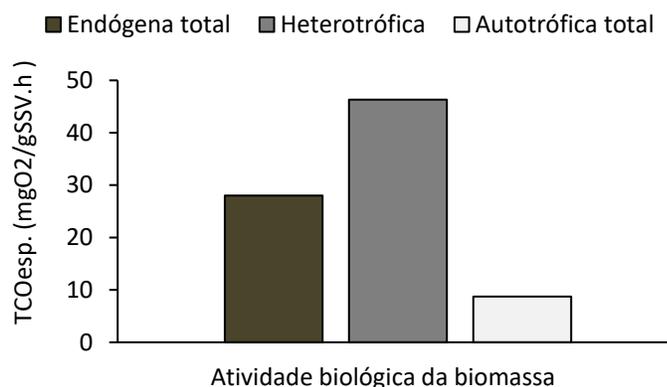


Figura 9. Taxas de consumo de oxigênio específicas médias pela biomassa no BRM utilizado.

Ao avaliar a TCOesp. autotrófica total, a qual está diretamente relacionada ao consumo do oxigênio a partir da degradação de compostos nitrogenados, o valor médio obtido foi de 8.73 mgO₂/gSSV.h. Este valor possivelmente se dá devido a criação de diferentes zonas no reator em decorrência da presença do leito móvel, sendo elas anaeróbias, anóxicas e facultativas, as quais favorecem o crescimento de bactérias nitrificantes no meio. Portanto, essas bactérias são responsáveis pelo elevado consumo de oxigênio em função da degradação de compostos nitrogenados, resultando em altos valores de TCOesp. autotrófica. No estudo de Kellner (2014), ao utilizar um biorreator a membrana de leito móvel de bateladas sequenciais, com 30% do seu volume útil composto por material suporte no tratamento de efluente sanitário, o autor obteve um valor médio de TCOesp. autotrófica de 8.71 mgO₂/gSSV.h. Portanto, evidencia que a utilização de um sistema de biorreator a membrana de leito móvel resulta numa TCOesp. autotrófica elevada, o que acontece devido ao desenvolvimento de bactérias nitrificantes no meio.

Ao realizar um estudo do tratamento de efluente da indústria de laticínios, Fraga *et al.* (2017) obtiveram a eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal de 99.6% ao utilizar um biorreator a membrana de leito móvel. Eficiência próxima a obtida no presente estudo, tendo em vista que as características do efluente varia de indústria para indústria, assim como, as condições operacionais do sistema podem influenciar nos resultados. Nos estudos de Li *et al.* (2008), ao utilizarem um biorreator a membrana com *internal-loop airlift reactor* no tratamento de água residual sintética, obtiveram remoções entre 84 e 96% de nitrogênio amoniacal.

A melhora na remoção das formas de nitrogênio nos efluentes associada ao processo de nitrificação a partir do uso do material suporte para o crescimento do biofilme é reportada também por Richard e Setter (1995), assim como, pela introdução do módulo de membranas nos biorreatores, promovendo a retenção e enriquecimento dos microrganismos nitrificantes (Silva *et al.*, 1998). Entretanto, tendo como resultado dos processos de nitrificação, possivelmente são encontradas concentrações elevadas de nitrato no efluente tratado, pois neste tipo de reação, o nitrogênio orgânico é convertido a NO_3^- . Portanto, há necessidade de uma unidade posterior para conversão do nitrato em nitrogênio gasoso (N_2).

Fósforo total

Além do nitrogênio, outro tipo de nutriente encontrado no efluente oriundo da indústria de laticínios é o fósforo, o comportamento das concentrações deste nutriente nos pontos avaliados durante a operação do sistema, assim como, sua eficiência total de remoção ao decorrer do período avaliado, estão dispostos na Figura 10.

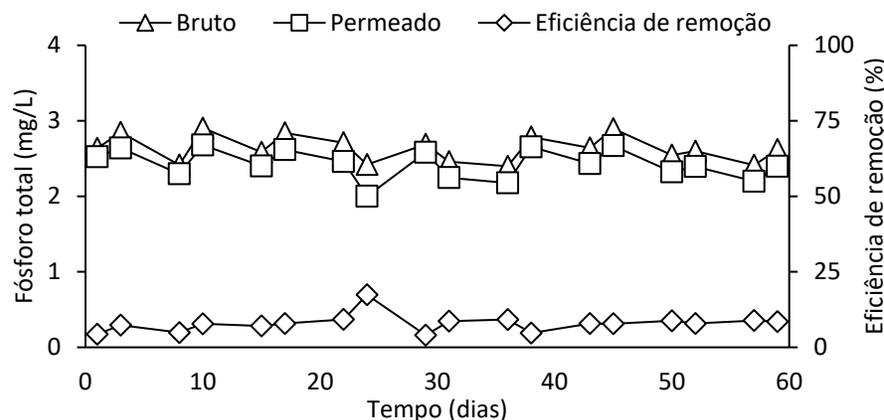


Figura 10. Comportamento das concentrações de fósforo ao decorrer da operação do sistema e sua eficiência total de remoção.

Verifica-se pouca redução da concentração de fósforo no permeado em relação ao efluente bruto, sendo que a eficiência média obtida no tratamento foi 7.9%, onde resultou no decréscimo da concentração média do efluente bruto de 2.7 ± 0.2 mg/L para 2.4 ± 0.2 mg/L no permeado, após o tratamento. Portanto, mostra-se que a utilização do sistema de biorreatores a membrana de leito móvel nas condições estudadas, não é uma alternativa promissora na remoção deste parâmetro. Nesta concepção, apenas pequena parte do fósforo presente no efluente é assimilado biologicamente a partir da síntese celular das bactérias (Lesjean *et al.*, 2003), as quais são retidas no reator pelas membranas e posteriormente removidas no processo de descarte de lodo.

Segundo Kortstee *et al.* (1994) apud Dabert *et al.* (2001), os microrganismos encarregados pela remoção de fósforo dos efluentes, necessitam de um período de 40 a 100 dias para se adaptarem e aclimatarem a tal composto, a partir disso, estes começam a acumular maiores concentrações de fósforo em seu organismo. Portanto, a idade do lodo adotada na presente pesquisa (20 dias) pode não ter sido suficiente para ocorrência de tal processo. Outro fator que favorece a criação desses organismos responsáveis pela remoção de compostos fosfatados, é a vantagem na competição por alimento quando a relação alimento/microrganismo (A/M) é baixa, pois, estes acabam se sobressaindo e proliferando de maneira facilitada (Yilmaz *et al.*, 2008). Porém, no estudo em questão, a relação A/M média obtida ao decorrer da operação do sistema foi de 0.26 ± 0.03 gDBO/gSSV.d.

Com o objetivo de aumentar a eficiência na remoção de fósforo dos efluentes, estudos relacionados aos eletrobiorreatores a membrana são cada vez mais desenvolvidos, com o intuito de promover a precipitação química do fósforo presente, pois, os íons dissociados do eletrodo de alumínio reagem com os íons fosfato, resultando em complexos insolúveis, portanto, estes precipitam e são removidos juntamente com o lodo. Manica (2019) reportou em seu estudo uma eficiência de remoção de 100% do fósforo presente em um esgoto sanitário sintético ao utilizar um sistema de eletrobiorreator a membrana.

Conclusões

Por meio dos dados apresentados, conclui-se que o sistema de tratamento composto por um biorreator a membrana de leito móvel misto, mostra-se eficiente na remoção de nitrogênio total Kjeldahl e nitrogênio amoniacal, sendo favorecido pelo desenvolvimento de microrganismos responsáveis pelos processos de nitrificação no leito móvel misto e a condições de operação do sistema. Porém, este tipo de tratamento não foi considerado promissor na remoção de fósforo total deste tipo de efluente para as condições adotadas na pesquisa.

Agradecimentos

A CAPES, onde o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências bibliográficas

- APHA (2017) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23rd. Ed.
- Belli, T. J., Bernardelli, J. K. B., Da Costa, R. E., Bassin, J. P., Amaral, M. C. S., Lapolli, F. R. (2017) Effect of solids retention time on nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in a sequencing batch membrane bioreactor. *Environmental technology*, **38**(7), 806-815.

- Belli, T. J., Do Amaral, P. A. P., Recio, M. A. L., Vidal, C. M. S., Lapolli, F. R. (2012) Biorreator à membrana em batelada sequencial aplicado ao tratamento de esgoto visando à remoção de nutrientes. *Engenharia sanitária e ambiental*, **17**(2), 143-154.
- Benjamin, M.M. (2002) *Water chemistry*. International Edition. New York, NY: McGraw-Hill, series in Water Resources and Environmental Engineering.
- Bitton, G. (2005) *Wastewater microbiology*. 3th edition. Gainesville, Florida: Wiley, 746 pp.
- Brasil (2011) Dispõem sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n. 430, de 13 de maio de 2011. Ministério do Meio Ambiente, Diário Oficial da União, no 92º, Brasília, DF, 16 maio de 2011, 89 pp.
- Brown, P., Ong, S. K., Lee, Y. W. (2011) Influence of anoxic and anaerobic hydraulic retention time on biological nitrogen and phosphorus removal in a membrane bioreactor. *Desalination*, **270**(1-3), 227-232.
- Brum, L. F. W., Júnior, L. C. O. S., Benedetti, S. (2009) Reaproveitamento de Água de Processo e Resíduos da Indústria de Laticínios, *Internacional Workshop Advances in Cleaner Production*, 2, São Paulo, Brasil.
- Cicek, N., Macomber, J., Davel, J., Suidan, M.T., Audic, J., Genestet, P. (2001) Effect of solids retention time on the performance and biological characteristics of a membrane bioreactor. *Water Science and Technology*, **43**(11), 43-50.
- Costa, R. E. (2018) *Estudo comparativo das tecnologias de biorreator a membrana de leito móvel e biorreator a membrana convencional no tratamento de esgoto sanitário: avaliação do desempenho na remoção de nutrientes e da colmatção das membranas operando os reatores em batelada sequencial*. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 224 pp.
- Dabert, P., Fleurat, A. L., Mounier, E., Delgenès, J. P., Moletta, R., Gordon, J. J. (2001) Monitoring of the microbial community of a sequencing batch reactor bioaugmented to improve its phosphorus removal capabilities. *Water Science and Technology*, **43**(3), 1-8.
- Fraga, F. A., García, H. A., Hooijmans, C. M., Míguez, D., Brdjanovic, D. (2017) Evaluation of a membrane bioreactor on dairy wastewater treatment and reuse in Uruguay. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **119**, 552-564.
- Formigoni, I. (2020) Principais países produtores de leite: dados de julho de 2020. *Farmnews*. Acesso em: 01, jul. de 2021, disponível em: <http://www.farmnews.com.br/gestao/principais-paises-produtores-de-leite/>.
- Fujii, F. Y., Piveli, R. P., Campos, F., Bueno, R. F., Sobrinho, P. A., (2013) Desempenho do reator integrado de lodo ativado com biofilme em leito móvel. *Eng Sanit Ambient*, **18**(4), 349-358.
- Hem, L.J., Rusten, B., Ødegaard, H. (1994) Nitrification in a moving bed biofilm reactor. *Water Research*, **28**(6), 1425-1433.
- Iorhemen, O. T., Hamza, R. A., Tay, J. H. (2016) Membrane Bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling. *Membranes*, **6**(2), 33.
- Jordão, E.P., Pessoa, C.A. (2011) *Tratamentos de esgotos domésticos*. 6ª Edição, Rio de Janeiro: ABES.
- Judd, S., Judd, C. (2006) *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*. 1. ed. Oxford: Elsevier Science Ltd.
- Kellner, R. L. (2014) *Biorreator a membrana de leito móvel em bateladas sequenciais para a remoção de nutrientes e matéria orgânica de efluentes sanitários*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 146pp.
- Kim, J.Y., Chang, I.S., Park, H.H., Kim, C. Y., Kim, J. B., Oh, J. H. (2008) New configuration of a membrane bioreactor for effective control of membrane fouling and nutrients removal in wastewater treatment. *Desalination*, **230**(1-3), 153-161.
- Kortstee, G. J., Appeldoorn, K. J., Bonting, C. F., Niel, E. W. V., Veen, H. W. (1994) Biology of polyphosphate accumulating bacteria involved in enhanced biological phosphorus removal. *Microbiology Reviews*, **15**(2-3), 137-153.

- Lesjean, B., Gnriss, R., Adam, C., Kraume, M., Luck, F. (2003) Enhanced biological phosphorus removal process implemented in membrane bioreactors to improve phosphorous recovery and recycling. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, **48**(1), 87.
- Li, Y. Z., He, Y. L., Ohandja, D. G., Ji, J., Li, J. F., Zhou, T. (2008) Simultaneous nitrification–denitrification achieved by an innovative internal-loop airlift MBR: Comparative study. *Bioresource Technology*, **99**, 5867–5872.
- Manica, M. (2019) *Eletrobiorreator a membrana aplicado ao tratamento de esgoto sanitário visando a remoção de matéria orgânica e nutrientes e o estudo do processo de colmatção da membrana*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental/Associação Ampla com UEPG, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati–PR, 114 pp.
- Meng, F., Chae, S. R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H. S., Yang, F. (2009) Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research*, **43**, 1489–1512.
- Ochoa, J.C., Colprim, J., Palacios, B., Paul, E., Chatellier, P. (2002) Active heterotrophic and autotrophic biomass distribution between fixed and suspended systems in a hybrid biological reactor. *Water Science & technology*, **46**, 397-404.
- Orth, R. (2020) *Tratamento de efluente de indústria papeleira por eletrobiorreator a membrana visando a remoção de nutrientes e matéria orgânica*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental/Associação Ampla com UEPG, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati–PR., 82pp.
- Park, H., Chang, I., Lee, K. (2015) *Principles os Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*. Boca Raton, Flórida: Taylor & Francis Group, LLC. 436 pp.
- Provenzi, G.T. (2005) *Biorreator à membrana submersa para tratamento biológico de efluentes: estudos hidrodinâmicos e físicoquímicos no controle da colmatção*. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 170 pp.
- Rivas, P. R., Pascual, J. M., Morillo, J. A., Jiménez, B. J., Poyatos, J. M., Rodelas, B., López, J. G. (2016) Interlinkages between bacterial populations dynamics and the operational parameters in a moving bed membrane bioreactor treating urban sewage. *Water research*, **88**, 796-807.
- Richard, M. (1995) Enhanced cold temperature nitrification in a municipal aerated lagoon using Ringlace fixed film media. Rocky Mountain American Water Works Association.
- Rosenberger S., Kraume M. (2002) Filterability of Activated Sludge in Membrane Bioreactors. *Desalination*, **146**, 373-379.
- Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y., Lygren, E. (2006) Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering*, **34**, 322–331.
- Setter, K. J. (1995) *Attached growth nitrification using Ringlace media*. Dissertação (Mestrado), Universidade da Columbia Britânica. Columbia, Canadá, 93pp.
- Silva, D.G.V., Urbain, V., Abeyasinghe, D.H., Rittmann, B.E. (1998) Advanced analysis of membrane-bioreactor performance with aerobicanoxic cycling. *Wat. Sci. Tech.* **38**, 505–512.
- Ujang, Z., Salim, M. R., Khor, S. L. (2002) The effect of aeration and non-aeration time on simultaneous organic, nitrogen and phosphorus removal using an intermittent aeration membrane bioreactor. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, **46**(9) 193-200.
- Von Sperling, M. (2009) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3. ed. 4. reimp. Belo Horizonte: DESA/UFMG.
- Wagner, J., Rosenwinkel, K-H. (2000) Sludge production in membrane bioreactors under different conditions. *Water Science and Technology*. **41**(10-11), 251-258.
- Wang, X. J., Xia, S. Q., Chen, L., Zhao, J. F., Renault, N. J., Chovelon, J. M. (2006) Nutrients removal from municipal wastewater by chemical precipitation in a moving bed biofilm reactor. *Process biochemistry*, **41**, 824–828.
- Wolff, D.B., Chavez, J.C.O., Paul, E., Costa, R.H.R. (2003) Estudo da biomassa heterotrófica e autotrófica ativa desenvolvida em reatores híbridos no tratamento de esgoto urbano. *Simpósio Nacional de Fermentações*. Florianópolis, SC, Brasil.

- Wu, J., Clech, P. L., Stuetz, R. M., Fane, A. G., Chen, V. (2008) Effects of relaxation and backwashing conditions on fouling in membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, **324**(1), 26-32.
- Xing, C-H., Qian, Y., Wen, X-H., Wu, W-Z., Sun, D. (2001) Physical and biological characteristics of a tangential-flow MBR for municipal wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 31-42.
- Yang, S., Yang, F., Fu, Z., Lei, R. (2009) Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor on organic carbon and nitrogen removal. *Bioresource Technology*, **100**, 2369–2374.
- Yilmaz, G., Lemaire, R., Keller, J., Yuan, Z. (2008) Effectiveness of an alternating aerobic, anoxic/anaerobic strategy for maintaining biomass activity of BNR sludge during long-term starvation, *Water Research*, **41**(12), 2590-2598.
- Zsirai, T., Buzatu, P., Aerts, P., Judd, S. (2012) Efficacy of relaxation, backflushing, chemical cleaning and clogging removal for an immersed hollow fibre membrane bioreactor. *Water Research*, **46** (14), 4499-4507.