

II-111 - DEMANDA ENERGÉTICA EM MBR: OPORTUNIDADES E DESAFIOS

Ana Carolina Santana Conceição⁽¹⁾

Graduada em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal do ABC (UFABC).

Eduardo Lucas Subtil⁽²⁾

Graduado em Oceanografia pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Mestre em Engenharia Ambiental pela UFES. Doutor em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP). Professor Adjunto da Universidade Federal do ABC (UFABC).

Endereço⁽¹⁾: Av. dos Estados, 5001 – Bangú - Santo André – SP – CEP: 09210-580 – Brasil – Tel: +55 (11) 4996-0088/0099- e-mail: anacarolina0308@hotmail.com

RESUMO

A crescente restrição e escassez hídrica demandam cada vez mais o reuso da água, o que impulsiona o desenvolvimento de tecnologias para recuperação dos recursos água, energia e nutrientes presentes nas águas residuárias. Em áreas urbanas, os Biorreatores com Membranas (MBR) são uma opção promissora de tecnologia para reuso devido à alta qualidade do efluente gerado, à menor área de instalação e produção de lodo e ao menor Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), apesar da alta demanda energética, necessária para aeração intensa das membranas para evitar o *fouling*, a qual tem sido foco de inúmeras pesquisas recentes. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi realizar levantamento de abordagens que visam reduzir o consumo energético em sistemas de MBR e indicar quais são as tendências atuais de desenvolvimento dessa tecnologia. A revisão bibliográfica foi realizada em bases de dados internacionais publicados entre 2010 e 2018. Foi verificado que a redução da demanda energética pode se dar através da economia, ou seja, otimização do processo que podem reduzir o consumo energético específico (CEE), ou através de processos e novas configurações que possuem o potencial de geração de energia. No primeiro caso, foram identificados estudos que relacionam a economia de energia a fatores como sistema de aeração para controle físico do *fouling* (tipo de bolhas, frequência de aeração), condições de operação do sistema de membranas (fluxo, PTM), configuração do sistema de membranas e integração com o processo biológico e material suporte para limpeza física das membranas. Já em termos de potencial para geração de energia, foram referidos o aproveitamento de metano (anaeróbio) e o processo bioeletroquímico. Assim, foi verificado que os estudos mais recentes têm se voltado ao estudo das possibilidades de geração de energia diretamente nos MBR, visando sua autonomia energética ao mesmo tempo em que gera efluente de maior qualidade. Assim, a incorporação de Células Combustíveis Microbianas (CCM), dando origem aos Biorreatores Eletroquímicos de Membranas (BREM), foi verificada sob diferentes abordagens, indicando novas possibilidades para a sustentabilidade dos sistemas de tratamento de esgotos domésticos e evidenciando desafios para a implantação segura e eficiente dessa tecnologia.

PALAVRAS-CHAVE: Biorreatores com Membranas, Demanda Energética, Tratamento de Efluente.

INTRODUÇÃO

Muitas estações de tratamento de água brasileiras encontram-se ou trabalhando acima de sua capacidade ou produzindo água com qualidade insatisfatória. Procurando suprir a demanda sempre crescente de água, mantendo sua qualidade, defronta-se com a escassez de recursos. A partir de tal constatação, faz-se necessário que se investiguem em laboratório novas tecnologias, que permitam estudar as inúmeras possibilidades de se obter água em quantidade mantendo a qualidade e custos baixos.

As projeções de crescimento populacional global indicam que até 2050 é esperado que 2,3 bilhões de pessoas viverão em áreas com grave restrição hídrica ou escassez absoluta de água, e 40% da população mundial poderá estar vivendo um déficit hídrico até 2030, em particular nas áreas urbanas (UNESCO, 2016). Essa situação, aliada a cenários ambientais, econômicos e sociais cada vez mais complexos, tem levado a uma preocupação sem precedente sobre a disponibilidade de água.

Neste contexto, a abordagem linear convencional da gestão dos recursos hídricos deve ser convertida em um gerenciamento integrado, sobretudo considerando o potencial de recuperação de recursos das águas residuárias (água, energia e nutrientes). Como um componente multidisciplinar e importante da gestão de recursos hídricos, a recuperação e o reuso de água podem ajudar a encurtar o ciclo entre o abastecimento de água e a disposição das águas residuárias, tornando uma opção atrativa para conservar e ampliar o abastecimento de água disponível.

Dentre as tecnologias desenvolvidas nas últimas décadas, os Biorreatores com Membranas Submersas (MBR) surgiram como uma das opções mais promissoras com grande potencial para a recuperação de água, energia e nutrientes, sobretudo na área urbana. Os MBR são sistemas de tratamento de efluentes não-convencionais que associam o tratamento biológico, geralmente o utilizado nos processos de lodos ativados, à tecnologia de separação por membranas (Cadore et al, 2014). Seu crescimento e consolidação nas últimas décadas estão associados principalmente as vantagens da tecnologia que incluem, principalmente: (1) a produção de um efluente de elevada qualidade e com características constantes, (2) menor área para instalação, (3) menor Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) e (4) menor produção de lodo (Kurita et al, 2015; Fenu et al, 2010; Cadore et al, 2014).

Apesar dessas vantagens e da consolidação do uso dessa tecnologia em diversos países, a seleção dos MBR como opção de tratamento ainda é limitada pelo maior custo do processo de separação por membranas e, principalmente, devido ao maior consumo energético decorrente da necessidade de aeração intensa dos módulos de membranas para reduzir o *fouling*, manter um alto fluxo e, assim, condições hidráulicas satisfatórias (Judd, 2006; Novotny, 2010; Palmowski et al, 2012).

Por isso, não é surpresa que grande das pesquisas e do desenvolvimento da tecnologia nos últimos anos foram focadas na questão energética do sistema. De fato, é possível observar que houve uma redução significativa de redução do consumo energético específico (CEE) de MBR a partir dos anos 2000 (Giesen et al, 2008; Longo et al, 2016). Além da população equivalente, a otimização do fluxo do sistema de membranas e da concentração de sólidos suspensos no tanque de aeração (SSTA) (mg/l), levaram também a uma redução do consumo energético, especialmente na demanda específica para aeração (Kitagawa et al, 2012).

Nesse contexto, devido à crescente necessidade de reuso de água e de redução do consumo de energia, diversas abordagens têm sido propostas para a redução da demanda energética de MBR, visando aumentar a viabilidade de sua utilização.

OBJETIVO

Realizar levantamento de abordagens que visam reduzir o consumo energético em sistemas de Biorreatores com Membranas (MBR) e indicar quais são as tendências atuais de desenvolvimento da tecnologia.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa consistiu em levantamento de artigos científicos em bases de dados internacionais publicados entre 2010 e 2018 referentes a fatores que podem reduzir a demanda energética em MBR. Esses fatores foram classificados entre duas abordagens: economia de energia e geração de energia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A redução da demanda energética em MBR pode se dar através da economia, ou seja, otimização do processo que podem reduzir o consumo energético específico (CEE), ou através de processos e novas configurações que possuem o potencial de geração de energia.

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO MBR – ECONOMIA DE ENERGIA

Grande parte das pesquisas desenvolvidas e voltadas para MBR refere-se a fatores que podem gerar economia de energia e incluem:

- Sistema de aeração para controle físico do *fouling* (tipo de bolhas, frequência de aeração);
- Condições de operação do sistema de membranas (fluxo, PTM);
- Configuração do sistema de membranas e integração com o processo biológico;
- Material suporte para limpeza física das membranas.

Sistema de aeração para controle físico do *fouling*

Apesar do uso do ar para o controle físico do *fouling* ter sido um marco na aplicação da tecnologia MBR por viabilizar o uso de membranas submersas diretamente no reator biológico, as questões relacionadas ao CEE de aeração das membranas ainda são cruciais para melhorar a sustentabilidade da tecnologia. Um dos fatores que tem sido avaliado refere-se ao tipo de bolha. Zhang et al (2011), em seu experimento em escala de laboratório, verificaram que a operação de MBR com bolhas grandes possuem menor Consumo Energético Específico (CEE), que passou de 2,07 kWh/m³ para operação com bolhas finas para 1,41 kWh/m³ com bolhas grandes, além de serem mais eficazes no controle do *fouling*, apesar de menos eficientes na transferência de oxigênio para a biomassa. No entanto, embora a utilização de bolhas grandes reduzir em cerca de 32% o CEE, a utilização de bolhas finas ainda é mais comum devido à maior transferência de oxigênio, decorrente de sua elevada área superficial. Vale destacar o lançamento recente da tecnologia de aeração por bolhas grandes por pulso (LEAPMbr), na qual o sistema de bombeamento pulsa uma grande bolha através de um feixe de fibras em camadas, criando uma ação de bombeamento de pistão altamente eficiente, tende a reduzir ainda mais o consumo energético para limpeza das membranas com ar (Koch, 2018; Barillon et al, 2013).

Além do tipo de bolha, a frequência de aeração (contínua, intermitente ou escalonada) também é outro fator que influencia no CEE. Barillon et al (2013) relataram que, ao compararem seis MBR diferentes, verificaram que o CEE daquelas que usavam membranas planas (0,45-0,55 kWh/m³) era significativamente maior que o das membranas de fibra oca (0,2-0,3 kWh/m³) especialmente devido ao tipo de aeração empregada. As membranas planas exigiam aeração constante para evitar o *fouling*, enquanto que nas de fibra oca era utilizada a aeração intermitente 10/10 (10s on/10s off) ou 10/30, tendo esta última resultado no menor CEE identificado neste estudo (0,17 kWh/m³). Assim, a demanda energética de MBR com membranas planas foi 30% maior que o de membranas de fibra oca.

Condições de operação do sistema de membranas (fluxo, PTM)

Outro aspecto identificado por Hoffmann e Krause (2012) como redutor do CEE de MBR é o controle do fluxo. Em sua revisão, esses autores verificaram que um dos fatores que aumenta o CEE é a subutilização da membrana, em condições em que há menor fluxo de permeado. Uma programação/automatização do sistema pode ser utilizada para parar a filtração por membrana quando o fluxo estiver abaixo do ótimo, evitando que o consumo específico seja muito maior, e liberando a filtração (*setpoint*) quando o fluxo for máximo. Um exemplo disso foi obtido ao aumentar-se o fluxo de 7 para 25 l/m².h, que resultou na redução do CEE de 1 para 0,3 kWh/m³ (redução de 70%). Com isso, os valores de CEE obtidos estiveram na faixa de 0,2 a 0,4 kWh/m³.

É importante ressaltar que o fluxo não deve ser aumentado indefinidamente. O que deve-se buscar é o valor ótimo de fluxo para que o CEE seja mínimo. Itonaga et al (2010), ao estudarem uma planta piloto de MBR e Osmose Reversa (OR) em Cingapura, identificaram os CEE para os fluxos de 25, 33 e 40 l/m².h e verificaram que houve redução significativa com o aumento do fluxo de 25 para 33 l/m².h. No entanto, não houve alteração significativa de CEE entre os fluxos de 33 e 40 l/m².h. Assim, o menor CEE obtido foi de 0,57 kWh/m³, para o fluxo de 33 l/m².h.

Além da configuração das membranas, Ferrero et al (2011) também analisaram taxas de fluxo de permeado (PTM) e a remoção de nutrientes biológicos de forma a estabelecer um sistema de controle para que pudessem identificar a máxima redução no CEE, o qual foi verificado com a mínima aeração recomendada pelo fabricante das membranas, de forma a não interferir visivelmente no *fouling* da membrana nem alterar a remoção de nutrientes.

Configuração do sistema de membranas e integração com o processo biológico

Menores CEE foram identificados também no estudo de Barillon et al (2013) com plantas de MBR que funcionavam sob condições hidráulicas ótimas (0,5–0,7 kWh/m³), com baixa concentração de lodo (3 g/l) e

fluxo contínuo ($0,6 \text{ kWh/m}^3$) e com membranas de fibra oca, tendo estas reduzido em cerca de 30% o CEE das plantas de MBR. A influência da configuração das membranas também foi objeto de estudo de Krzeminski et al (2012), quando verificaram que membranas planas tiveram CEE de 33 a 37% maior que o CEE de membranas de fibra oca, tendo esses percentuais ocasionado economia de $0,2 \text{ kWh/m}^3$. Outro aspecto redutor do CEE identificado por Hoffmann e Krause (2012) é a integração de membranas submersas diretamente no tanque de nitrificação do reator. Essa ação faz com que o oxigênio da aeração forneça cerca de 90% do oxigênio demandado para o tratamento, reduzindo então a necessidade geral de aeração do sistema. Krause (2011, 2001) destaca que $0,1 \text{ kWh/m}^3$ pode ser salvo ao utilizar o oxigênio disponível no tanque de nitrificação, bem como pelo fato de não requerer recirculação.

Material suporte para limpeza física das membranas

Na revisão realizada por Hoffmann e Krause (2012), foram identificados outros três aspectos que geraram redução no CEE, sendo a limpeza mecânica das membranas o primeiro deles. Nesse aspecto, a remoção contínua da camada de torta na superfície da membrana é feita por grânulos de material inerte combinados com aeração. Esse processo, além de manter a qualidade do efluente, pode levar a taxas de fluxo cerca de 20% maiores, minimizando a área de membrana requerida e, por conseguinte, a aeração demandada, reduzindo assim o consumo de energia. Outra iniciativa estudada por Kurita et al (2015) foi o efeito da introdução de material granulado na demanda energética de um MBR com defletores, realizada em escala piloto no Japão com esgoto sanitário. Em suas conclusões, foi verificado que pode haver redução de 50% ou mais na energia demandada para aeração, necessária para reduzir a *fouling* na membrana, através da introdução da material granulado. No entanto, isso causou um aumento do *fouling*, que não pôde ser removido por método físico de limpeza da membrana e consequente dano a ela. Os próprios autores sugeriram que modificações da configuração do reator e/ou aumento do volume dos grânulos pode mitigar esse efeito negativo.

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO MBR – ECONOMIA DE ENERGIA

A geração de energia em MBR pode ocorrer a partir da integração de processos como o aproveitamento do metano gerado ou do processo bioeletroquímico.

Geração de metano – anaeróbio

No estudo de Mei et al (2016), a geração de energia estava relacionada à produção de metano em Biorreator Anaeróbio de Membrana (AnMBR). Sob condições controláveis de carga orgânica ($0,43 - 0,90 \text{ kgCOD}/(\text{kgVSS}/\text{d})$) e tempo de retenção de lodo (pelo menos 50 dias), foi possível obter recuperação líquida de energia. Quanto às temperaturas estudadas ($35, 25$ e 15°C), foi verificado que as temperaturas de 35°C e 25°C foram mais energeticamente eficientes e poderiam atingir a produção de energia líquida dentro de uma certa faixa de fluxo. O balanço energético neutro desse estudo foi obtido, à 35°C , com fluxo variando entre $8,8$ e $10,5 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$ e tempo de retenção hidráulica (TDH) de $5,8$ a $4,8 \text{ h}$, e à 25°C , com fluxo de $6,0$ a $6,7 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$ e TDH de $8,0$ a $7,1 \text{ h}$ (Mei et al, 2016). Wei et al (2014) também conduziram um estudo visando a recuperação energética através do aproveitamento do metano gerado em AnMBR sob condições mesofílicas, quando o consideraram um tecnologia promissora para o tratamento de águas residuárias municipais devido ao bom desempenho em termos de carga orgânica específica (acima de $0,6 \text{ g DQO}/\text{g SSV}/\text{d}$), baixa produção de biomassa ($0,015\text{-}0,026 \text{ g SSV}/\text{g DQO}$) e fluxo sustentável de ($6,0 \text{ L}/\text{m}^2\text{h}$); que resultaram em uma alta produção de metano de mais de $300 \text{ ml}/\text{g DQO}$.

Processo bioeletroquímico

Outra forma de geração de energia nos sistemas de tratamento de esgotos é através da Célula Combustível Microbiana (CCM) que, apesar de capaz de gerar energia isoladamente, não resulta em efluente de qualidade satisfatória e possui baixa eficiência no tratamento devido à limitação na retenção de biomassa (Tian et al, 2013, Wang et al, 2013). Assim, diversos estudos têm avaliado a eficiência do tratamento e da geração de energia em sistemas que combinam a tecnologia das CCM com o processo de separação por membranas, denominados de Biorreatores Eletroquímicos de Membranas (BREM). Várias foram os estudos que propuseram diferentes configurações e condições operacionais para BREM (Wang et al, 2013, 2016, Tian et al, 2014, Zhou et al, 2015, Ma et al, 2015).

Wang et al (2016) verificaram que a produção de H_2O_2 no cátodo e os efeitos do campo elétrico na repulsão eletrostática entre o lodo e a membrana podem ser as duas principais razões para a mitigação do *fouling* obtida na membrana. Além disso, houve redução de 93,7% na Demanda Química de Oxigênio (DQO) e de 96,5% de nitrogênio amoniacal, o que indica desempenho satisfatório no tratamento do efluente neste BREM. Em termos energéticos, foi obtida potência máxima de $1,43 \text{ W/m}^3$ e uma densidade de corrente de $18,49 \text{ A/m}^3$ (Wang et al, 2016).

Tian et al (2014) testaram um sistema combinado de CCM com MBR e de fato identificaram redução do *fouling* na membrana. Contudo, a eletricidade obtida no AnMBER esteve abaixo da expectativa, o que demonstrou a necessidade de otimização do eletrodo e da operação, de modo que impulse a produção de eletricidade. Entretanto, os estudos de Zhou et al (2015) e Ma et al (2015) reforçam o potencial satisfatório de geração de energia em BREM em ambos os estudos, apesar de analisarem configurações e condições operacionais distintas. Zhou et al (2015) também relatam que no sistema BREM do tipo overflow houve geração eficiente de eletricidade, com uma densidade de potência máxima de 629 mW/m^3 e excelentes eficiências de remoção de DQO (92,6%), $N-NH_4$ (96,5%) e N -total (73,9%) sob uma faixa apropriada de tempo de detenção hidráulica (8,5 - 16,9h). Já os estudos de Ma et al (2015) demonstram que o consumo total de energia foi reduzido em 20% em relação ao MBR funcionando com circuito aberto e resultou em um CEE de cerca de $0,386 \text{ kWh/m}^3$, além de terem reforçado a capacidade de gerar efluente de maior qualidade, a redução no *fouling* da membrana e demonstrado a facilidade de incorporar o sistema de CCM-MBR à plantas de tratamento existentes visando a sustentabilidade e a melhoria dos atuais sistemas de implantados. Na Figura 1 é mostrada a configuração do BREM proposto por Ma et al (2015).

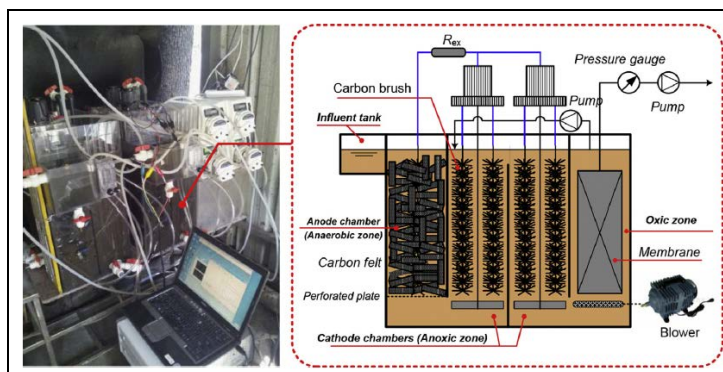


Figura 1: Configuração do BREM proposto por Ma et al (2015).

Nesse contexto, é possível verificar que estudos científicos indicam o potencial dos BREM, tanto para prover efluente de qualidade quanto para a sustentabilidade energética e a modernização dos sistemas. Contudo, também é possível verificar que essa tecnologia ainda precisa superar alguns desafios para sua aplicação em plantas reais de tratamento de águas residuárias municipais, tais como:

- estabilizar a operação a longo prazo;
- evidenciar exatamente os mecanismos de mitigação do *fouling* nas membranas;
- identificar configurações e condições operacionais ideais;
- padronizar a qualidade do efluente para atender a padrões cada vez mais rigorosos de descarte de águas residuárias.

CONCLUSÕES

A partir do levantamento realizado, foi possível identificar duas grandes abordagens visando a redução da demanda energética de Biorreatores de Membranas, uma focada na economia de energia e outra voltada para a geração de energia nos MBR, e diversos fatores que, controlados, podem promover essa redução. Foi observado ainda que os estudos mais recentes têm se voltado ao estudo das possibilidades de geração de energia diretamente nos MBR, visando sua autonomia energética ao mesmo tempo em que gera efluente de maior qualidade. Assim, a incorporação de CCM, dando origem aos BREM, foi verificada sob diferentes

abordagens, indicando novas possibilidades para a sustentabilidade dos sistemas de tratamento de esgotos domésticos e evidenciando desafios para a implantação segura e eficiente dessa tecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Barillon, B., Martin Ruel, S., Langlais, C., Lazarova, V. *Energy efficiency in membrane bioreactors. Water Science & Technology*, v. 67, n. 12, p. 2685-2691, 2013.
2. Cadore, I. R., Silva, M. K., Pollo, L. D., Tessaro, I. C. Biorreatores com membranas: uma alternativa para o tratamento de efluentes. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 2014
3. Fenu, A., Roels, J., Wambecq, T., De Gussem, K., Thoeys, C., De Gueldre, G., Van De Steene, B. *Energy audit of a full scale MBR system. Desalination*, v. 262, p. 121-128, 2010.
4. Ferrero, G., Monclús, H., Buttiglieri, G., Comas, J., Rodriguez-Roda, I. *Automatic control system for energy optimization in membrane bioreactors. Desalination*, v. 268, p. 276-280. 2011.
5. Giesen, A., van Bentem, A., Gademan, G., Erwee, H. *Lessons learnt in facility design, tendering and operation of MBR's for industrial and municipal wastewater treatment. Water Institute of SA*, 102, 2008.
6. Hoffmann, C., Krause, S. *An innovative approach to improve energy efficiency of Membrane Bioreactors (MBR). F & S International Edition*, n. 13, p. 49-52, 2013.
7. Itonaga, T., Oda, Y., Kawashima, T., Chidambara Raj, C. B., Bartels, C. *Evaluating Membrane Bioreactor Performance When Used with RO for Water Reclamation in Singapore. IDA Journal of Desalination and Water Reuse*, v. 2, n. 4, p. 44-51, 2010.
8. Judd, S. *The MBR Book. Principles and Applications of Membrane Bioreactors*. IN: *Water and Wastewater Treatment*, Elsevier, 2006.
9. Kitagawa, S., Oda, Y., Sasakawa, M., Itonaga, T., Adachi, T., Raj, C. B. C., Kekre, K. A. *Membrane bioreactor (MBR) performance for reducing energy demand*. 2012.
10. Koch. *PULSION® MBR*. 2018.
11. Krause, S., Zimmermann, B., Thiemig, C. *Untersuchungen zum Ressourcen schonenden Betrieb von Membranbelebungsanlagen (MBR). Korrespondenz Abwasser*, v. 58, n. 9, 2011.
12. Krzeminski, P., Van der Graaf, J. H. J. M., Van Lier, J. B. *Specific energy consumption of membrane bioreactor (MBR) for sewage treatment. Water Science & Technology*, v. 65, n.1, p. 380-392, 2012.
13. Kurita, T., Kimura, K., Watanabe, Y. *Energy saving in the operation of submerged MBRs by the insertion of baffles and the introduction of granular materials. Separation and Purification Technology*, v. 141, p. 207-213. 2015.
14. Longo, S., d'Antoni, B. M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., Lema, J. M., Iglesias, M. M., Soares, A., Hospido, A. *Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. Applied energy*, v. 179, p. 1251-1268, 2016.
15. Ma, J., Wang, Z., He, D., Li, Y., Wu, Z. *Long-term investigation of a novel electrochemical membrane bioreactor for low-strength municipal wastewater treatment. Water research*, v. 78, p. 78-110, 2015.
16. Mei, X., Wang, Z., Miao, Y., Wu, Z. *Recover energy from domestic wastewater using anaerobic membrane bioreactor: Operating parameters optimization and energy balance analysis. Energy*, v. 98, p. 146-154, 2016.
17. Novotny, V. *Water-energy nexus – towards zero pollution and GHG emissions of future (eco) cities*. IN: *Water Infrastructure for Sustainable Communities*. IWA publishing, London, 2010
18. Palmowski, I., Veltmann, k., Pinnekamp, J. *Energy optimization of large scale membrane bioreactors – importance of the design flux*. EN: *Water-Energy Interactions in Water Reuse (UK)*. 2012.
19. Tian, Y. Ji, C., Wang, K., Le-Clech, P. *Assessment of an anaerobic membrane bio-electrochemical reactor (AnMBER) for wastewater treatment and energy recovery. Journal of Membrane Science*, v. 450, p. 242-248, 2014.
20. UNESCO. *Água e emprego - Fatos e números*. IN: *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2016*. 2016.
21. Wang, J., Bi, F., Ngo, H. H., Guo, W., Zhang, H., Zhang, X. *Evaluation of energy-distribution of a hybrid microbial fuel cell-membrane bioreactor (MFC-MBR) for cost-effective wastewater treatment. Bioresource Technology*, v. 149, p. 163-168, 2016.
22. Wang, J., Zheng, Y.W., Jia, H., Zhang, H.W. *In situ investigation of processing property in combination with integration of microbial fuel cell and tubular membrane bioreactor. Bioresource Technology*, v. 149, p. 163-168, 2013.

23. Wei, C. H., Harb, M., Amy, G., Hong, P. Y., Leiknes, T. *Sustainable organic loading rate and energy recovery potential of mesophilic anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. Bioresource Technology*, v. 166, p. 326-334, 2014.
24. Yoon, S-H. *Specific energy demand (SED) of immersed MBR. Membrane Bioreactor Process – Principles and applications (Advances in Water and Wastewater Transport and Treatment)*, 1st ed. 2016.
25. Zhang, K., Wei, P., Yao, M., Field, R. W., Cui, Z. *Effect of the bubbling regimes on the performance and energy cost of flat sheet MBRs. Desalination*, v. 283, p. 221-226. 2011.
26. Zhou, G., Zhou, Y., Zhou, G., Lu, L., Wan, X., Shi, H. *Assessment of a novel overflow-type electrochemical membrane bioreactor (EMBR) for wastewater treatment, energy recovery and membrane fouling mitigation. Bioresource Technology*, v. 196, p. 648-655, 2015.