

DESEMPENHO DO REATOR DE BIOFILME POR MEMBRANA AERADA (MABR) DE GRANDE ESCALA PARA A INTENSIFICAÇÃO DE PROCESSO SUSTENTÁVEL EM WWTPS EXISTENTES

Daniel Coutts⁽¹⁾

Engenheiro de processos de águas residuais

Matt Reeve⁽²⁾

Engenheiro de processos

Giuseppe Guglielmi⁽³⁾

Gerente regional de produtos

Jeff Peeters⁽⁴⁾

Gerente de produtos

Marcus Vallero⁽⁵⁾

Gerente de vendas

Endereço⁽¹⁾: 519 Guelph, Ontário, Canadá – e-mail: daniel.coutts@veolia.com

RESUMO

O crescimento populacional e a urbanização exacerbam a dificuldade encontrada pelas empresas de saneamento básico para proteger a saúde pública e os ecossistemas aquáticos. Ter mais atenção à sustentabilidade e à redução da emissão de GEE significa que são necessárias novas soluções para contornar essas dificuldades. A tecnologia de reator de biofilme por membrana aerada (MABR) demonstrou que promete intensificar o sistema de tratamento secundário, sendo ao mesmo tempo sustentável, econômica e flexível. Esta pesquisa usa estudos de caso que demonstram como o MABR surgiu na forma de solução de intensificação do processo sustentável. Quatro exemplos de grande escala destacam a flexibilidade do MABR na entrega de valor em uma grande variedade de cenários de intensificação; e uma demonstração de grande escala destaca as capacidades de redução de N₂O do MABR.

PALAVRAS-CHAVE: reator de biofilme por membrana aerada, intensificação de processo, remoção de nutriente biológico

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a urbanização sobrecarregam a atual infraestrutura de saneamento. Os aumentos de carga muitas vezes devem ser tratados em limites de descarga mais rigorosos para atender aos regulamentos de remoção de nutrientes. A intensificação de processo pode contornar essas dificuldades e contribuir para a indústria de saneamento que: i) protege a saúde pública e o meio ambiente; ii) limita a pegada de carbono da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE); e iii) contribui com a economia circular.

A intensificação de processo é o meio de melhorar o desempenho de um processo atual ou a concepção de um novo processo com relação aos *benchmarks* econômicos e ambientais (Wasewar, 2021). A intensificação de processo na indústria de saneamento maximiza as capacidades de tratamento da infraestrutura atual. Os cenários que podem se beneficiar com a intensificação de processo abrangem:

1. *Upgrade* de um sistema de nitrificação para a remoção biológica de fósforo (EBPR – *enhanced biological phosphorus removal*).
2. Aumento da capacidade de tratamento do sistema de remoção de NT ou amônia.
3. *Upgrade* de um sistema de remoção de matéria carbonácea para um sistema com remoção de amônia ou nitrogênio total (NT)

As primeiras gerações das tecnologias de intensificação de processo muitas vezes entregavam mais capacidade de tratamento com a intensificação do uso de energia. Com o aumento do custo da eletricidade e da atenção às

emissões de GEE (gases de efeito estufa), surgiram novas soluções de intensificação de processo que entregam mais a partir da infraestrutura atual, diminuindo ao mesmo tempo o impacto ambiental. No caso das emissões de GEE, as principais fontes da pegada de carbono da ETE são, não necessariamente nesta ordem: i) energia usada no tratamento; ii) CO₂ do processo aeróbico; iii) N₂O da remoção de nitrogênio ou processo de nitrificação; iv) CH₄ da digestão de sólidos; e v) CO₂ do uso químico (tanto na produção quanto no transporte). O N₂O da remoção de nitrogênio ou nitrificação contabiliza até 43% da pegada de carbono de uma estação, quando há digestão de lodo primário ou residual (Parravicini et al., 2016).

REATOR DE BIOFILME POR MEMBRANA AERADA

A tecnologia de reator de biofilme por membrana aerada (MABR) foi pensada, originalmente, há mais de 30 anos (Syron e Casey, 2008; Martin e Nerenberg, 2012). A base dessa tecnologia é um biofilme contra-difusão em que o doador de elétron (substrato) e o receptor de elétron (tipicamente o oxigênio) entram no biofilme em lados opostos. Suas vantagens, descritas anteriormente, abrangem: i) altas taxas de nitrificação; ii) nitrificação e desnitrificação simultâneas (SND); iii) estabilização de pico passiva; iv) semeadura de biofilme rico em nitrificador ao crescimento suspenso; v) resiliência do processo; vi) redução de N₂O; e vii) transferência de oxigênio altamente eficiente (Houweling et al, 2017; Houweling et al, 2020; Uri Carreño et al, 2020).

A tecnologia de MABR passou a ser comercializada, em 2016, com a introdução de diversos produtos comerciais. Nessa época, havia incertezas tecnológicas quanto à implementação dessa tecnologia em escala, incluindo o controle da espessura do biofilme, mistura e renovação de substrato, densidade de compactação em ambientes majoritariamente sólidos e custo-benefício (Peeters et al, 2015). A primeira instalação de MABR para *upgrade* do tratamento de águas residuais de grande escala no mundo foi em 2017, com os fornecedores dessa tecnologia dirimindo as primeiras incertezas e demonstrando que o MABR é capaz de entregar intensificação de processo, sendo ao mesmo tempo sustentável, econômico e flexível.

O objetivo desta pesquisa é apresentar estudos de caso que demonstram como o MABR surgiu como uma solução de intensificação do processo sustentável, e as lições aprendidas com as primeiras instalações de grande escala. A tecnologia atende os desafios que a indústria de saneamento enfrenta na intensificação do processo de tratamento secundário de forma sustentável, com foco no consumo de energia e emissões de N₂O. Quatro exemplos de intensificação destacam a flexibilidade do MABR na entrega de valor em uma grande variedade de cenários, enquanto uma demonstração de grande escala destaca o potencial de redução de N₂O do MABR.

YORKVILLE-BRISTOL SANITARY DISTRICT, EUA

A *Yorkville-Bristol Sanitary District* (YBSD) é proprietária e opera a estação de tratamento de esgoto da cidade de Yorkville no estado de Illinois, EUA. A estação atende um equivalente de população (PE) de 18.500, com vazão diária média (ADF) na concepção de 13,7 MLD e carga de demanda de oxigênio biológico de cinco dias (DBO₅) de 2.155 kg/d. A YBSD enfrentou dois desafios em 2017.

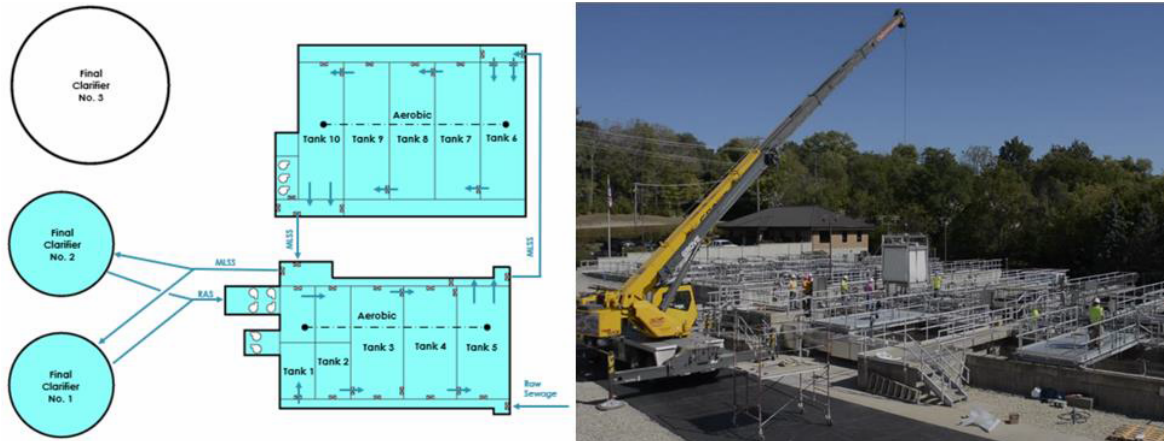
Até 2017, a YBSD passou por um aumento na carga orgânica. Previu-se que a estação estava se aproximando de sua capacidade nominal e precisava acomodar um aumento de carga de 45%. Esperava-se que a YBSD pudesse atender o novo limite de fósforo total (FT) no efluente de FT < 1 mgP/L até a metade de 2019. Para tratar desse desafio combinado de aumento de carga e limite de descarga mais rigoroso, a YBSD optou pelo MABR para conseguir a remoção biológica otimizada do fósforo (EBPR), alcançando, ao mesmo tempo, o aumento de carga requerido.

Antes de 2017, o sistema de tratamento secundário era um sistema de lodos ativados convencional (LAC) nitrificante de fluxo pistonado de fase única. O sistema existente tinha utilizado todo o terreno disponível. Qualquer expansão demandaria a construção de uma planta de tratamento separada na propriedade adjacente, assim como atualizações de infraestrutura de grandes proporções, a fim de lidar com as complexidades hidráulicas da nova construção. A YBSD buscava intensificar o sistema de LAC para lidar com os desafios de tratamento impostos pelo aumento de carga e o novo limite de FT.

A imagem à esquerda, na Figura 1, mostra o sistema antes da atualização para MABR, enquanto a imagem à direita mostra a instalação de MABR. O upgrade para MABR foi encomendado no outono de 2017. O primeiro

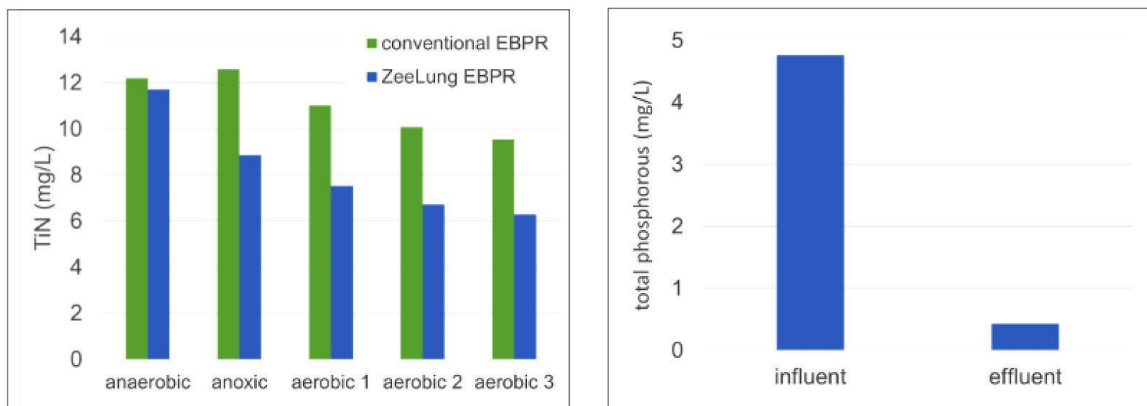
tanque foi convertido em zona anaeróbica; já o segundo foi convertido em zona de MABR, onde a remoção de nitrogênio total ocorria através de nitrificação/desnitrificação simultânea. Os oito tanques remanescentes continuaram sendo aeróbicos.

Figura 1 – Esquerda: processo de tratamento secundário da YBSD antes da atualização para MABR em 2017. Direita: instalação dos cassetes do MABR em 2017.



A sinergia entre o MABR e a EBPR na YBSD é demonstrada na Figura 2. A figura da esquerda utiliza amostras compostas coletadas no local, em comparação ao sistema equivalente modelado sem MABR, a fim de demonstrar a intensificação do MABR na remoção de NT. O nitrogênio total resultante, mais baixo no retorno do lodo de recirculação, beneficia a condição anaeróbica no primeiro tanque na obtenção de desempenho de EBPR estável, conforme exibido na figura da direita.

Figura 2 – Resultados de desempenho do MABR na YBSD para nitrogênio e fósforo.



ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DE HESPELER (CANADÁ)

A estação de tratamento de águas residuais (WWTP) de Hespeler, em Cambridge (Ontário), é parte de uma rede de treze plantas que atendem a mais de 600.000 moradores na região de Waterloo. A ETE de Hespeler tem capacidade de vazão média de 9320 m³/dia, e trata uma carga diária de DBO5 média de 1.870 kg/dia. Atualmente, essa planta precisa remover sólidos suspensos totais (SST) e DBO5, e usa um processo de aeração prolongado de lodos ativados convencional, que nitrifica sazonalmente (nitrificação limitada no inverno canadense). Antecipando que a legislação no futuro irá limitar a amônia no efluente tratado, o sistema precisa de nitrificação estável o ano inteiro.

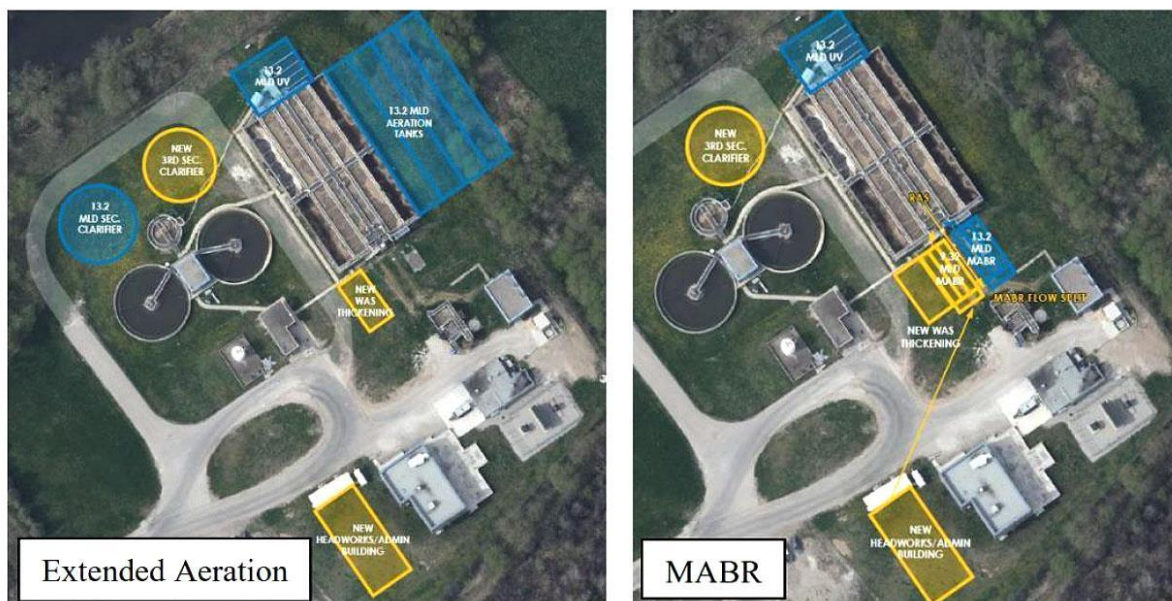
Em 2019, a ETE de Hespeler desejava intensificar o sistema de tratamento secundário existente, para acomodar a nitrificação exigida e alcançar um aumento de 42% na capacidade de tratamento. Essa ETE também estava encarregada de fazer um *upgrade* do tratamento primário, do espessamento do lodo e da adição de um clarificador extra. O objetivo da intensificação era alcançar nitrificação o ano todo, em um sistema projetado para DBO5 e remoção de SST. A solução convencional demandaria obras civis adicionais de novos tanques e a equipe do projeto estudou o impacto do MABR na redução do volume adicional requerido.

O estudo teve quatro aprendizagens principais:

1. A intensificação através do MABR alcançou, consistentemente, a remoção de amônia requerida (comprovada com o estudo piloto).
2. O custo do *upgrade* para MABR era 50% menor do que a aeração prolongada ou a atualização do CAS.
3. O projeto de MABR foi executado em etapas para acomodar a remoção da carga requerida para a necessidade imediata, permitindo uma expansão simples de acordo com o aumento de cargas futuras.
4. Uma economia de energia >30% em relação à aeração do processo.

A Figura 3 mostra as opções de atualizações do local – as planejadas e as alternativas – sobrepostas à estação existente. A avaliação da aeração estendida, que aparece na imagem da esquerda, indicou a necessidade de um quarto clarificador e do espelhamento do tanque de aeração existente. O projeto do MABR consistia em oito tanques com o propósito específico de manter a operação contínua da estação existente. Quatro tanques seriam construídos na primeira fase e outros quatro seriam construídos para cargas futuras. Os tanques do MABR eram 70% menores do que os tanques aeróbicos necessários.

Figura 3 – Sobreposição comparativa entre a atualização da planta de aeração estendida e a atualização da planta para MABR intensificado.



ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SPERNAL-REDDITCH OPERADA POR SEVERN TRENT WATER

A estação de tratamento de esgoto de Sernal-Redditch está localizada na região de Birmingham, no Reino Unido. A seção de processo biológico da planta era composta de dois sistemas operando em paralelo: i) o sistema de LAC, que trata 60% de efluente após clarificação primária; e ii) o processo de biofiltração que trata 40% do

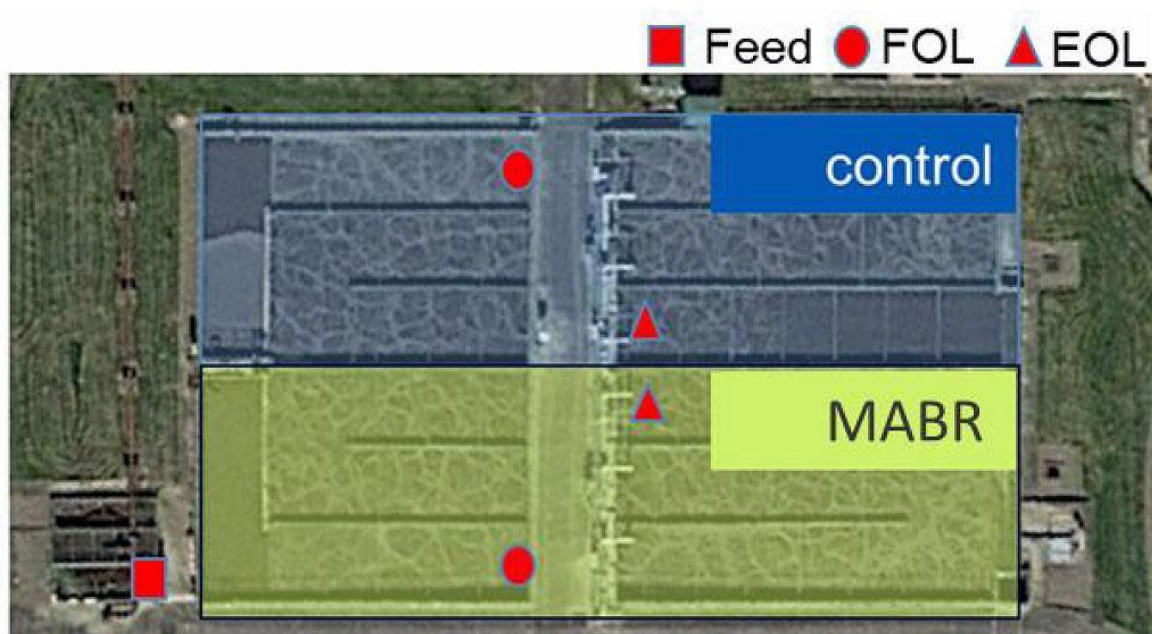
efluente após a clarificação primária. O sistema de LAC trata uma vazão média de 17.000 m³/dia, DBO5 média de 1.800 kg/dia e retorno de centrado da centrífuga que recebe lodo digerido do digestor local.

A *Severn Trent Water* (STW), que é a proprietária e opera as estações na região central do Reino Unido, realiza projetos de inovação na ETE de Spernal-Redditch. A STW tem interesse nas tecnologias de intensificação que podem ser prontamente integradas aos sistemas de LAC existentes para:

- atingir requerimentos de descarga de amônia mais rigorosos impostos às estações de tratamento de esgoto;
- intensificar a infraestrutura atual, a fim de controlar as altas cargas advindas do crescimento populacional;
- diminuir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), relativas ao consumo de energia, e as emissões de N₂O resultantes da remoção de amônia.

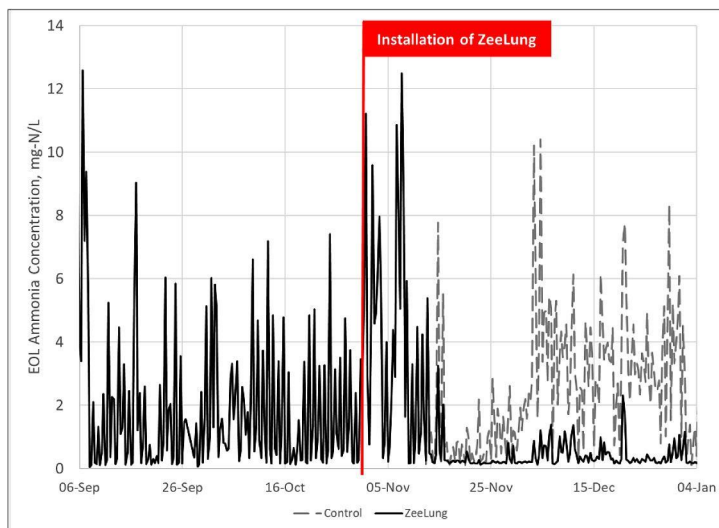
A STW optou por demonstrar a tecnologia de MABR, na planta de Spernal, com o intuito de entender o seu potencial na entrega de intensificação de processo e na diminuição de emissões de GEE. A parte do LAC do sistema de tratamento secundário era composta de seletor anóxico, seguido por uma zona aeróbica. A zona seletora representa 8% do volume biológico geral. A STW comparou uma faixa de controle sem MABR a uma faixa com *retrofit* de cassetes do MABR no seletor. A Figura 4 mostra a configuração do estudo com as localizações dos analisadores online de amônia utilizados na medição do desempenho das duas faixas. Havia três localizações em cada faixa analisada: i) a alimentação às faixas, ii) a frente da faixa (FOL) e iii) o fim da faixa (EOL).

Figura 4 – Vista geral de duas das três faixas de LAC utilizadas na demonstração comparativa com MABR.



O sistema MABR foi comissionado em outubro de 2020. O comissionamento e a instalação de cassetes foram realizados em uma semana. A Figura 5 demonstra a transição da faixa 2 através do *upgrade* para MABR. A concentração de amônia no EOL da linha 2, onde os cassetes do MABR foram instalados, exibiu alta variabilidade antes da atualização, mas esta foi consequentemente eliminada em três semanas após a instalação do MABR. A comparação entre a faixa de controle e a faixa instalada com MABR demonstra que a resiliência adicional que o MABR trouxe ao LAC, no primeiro mês de operação, está ligada principalmente ao benefício da estabilização de picos de concentração, que são inerentes da tecnologia.

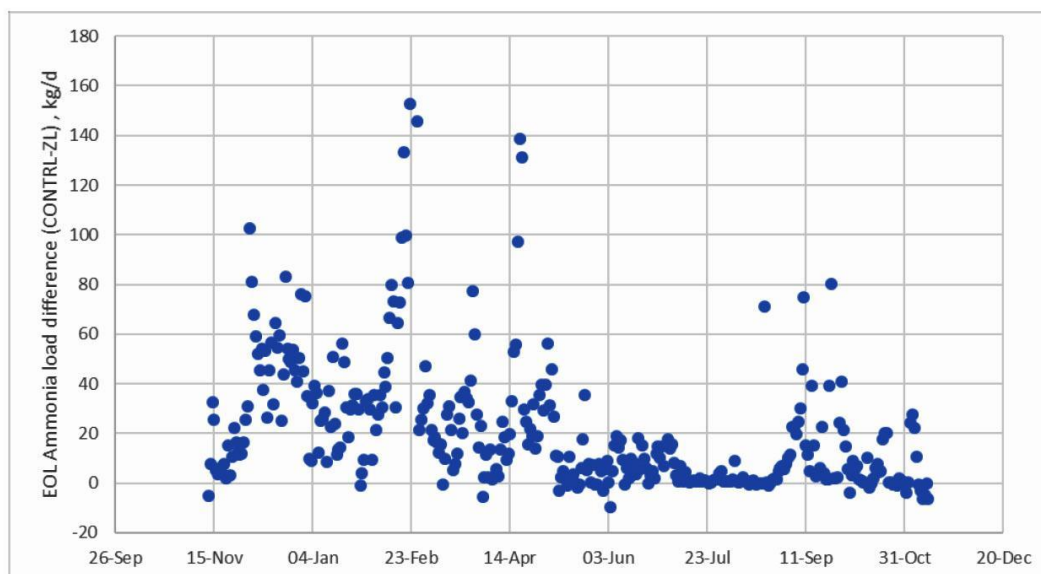
Figura 5 – Dados comparativos mostrando a transição da segunda faixa durante o funcionamento do MABR.



O sistema tem mantido uma operação robusta e consistente desde o seu comissionamento em 2020. Destaca-se a frequência da taxa de transmissão de oxigênio (OTR), que é uma medida normalizada do oxigênio consumido pelas bactérias, e a eficiência de transmissão de oxigênio (OTE) durante a operação. O sistema foi capaz de manter uma média de OTE e OTR de 36% e 13,8 g-O₂ d-1 m-2. O sistema foi capaz de alcançar um pico de OTR e OTE de 19,5 g-O₂ d-1 m-2 e 50%, respectivamente.

O impacto do MABR na linha de processo geral é observado na comparação de cargas de amônia no EOL, que está resumida na Figura 6. No inverno, quando a remoção de amônia tende a ser mais vulnerável, a faixa equipada com MABR é capaz de remover cargas adicionais de amônia e tornar o processo geral mais estável. O benefício do MABR na estação de Sernal foi demonstrado principalmente no inverno; já no verão, foi observada consistência em ambas as faixas. As médias no ano todo, no inverno inglês (nov-abr) e no verão inglês (mai-set), da remoção de carga adicional na faixa com MABR foram, respectivamente, 20 kg d-1, 36 kgN d-1 e 9,6 kgN d-1.

Figura 6 – Diferença na medição de amônia no EOL, mostrando o benefício do MABR na estabilização do pico.



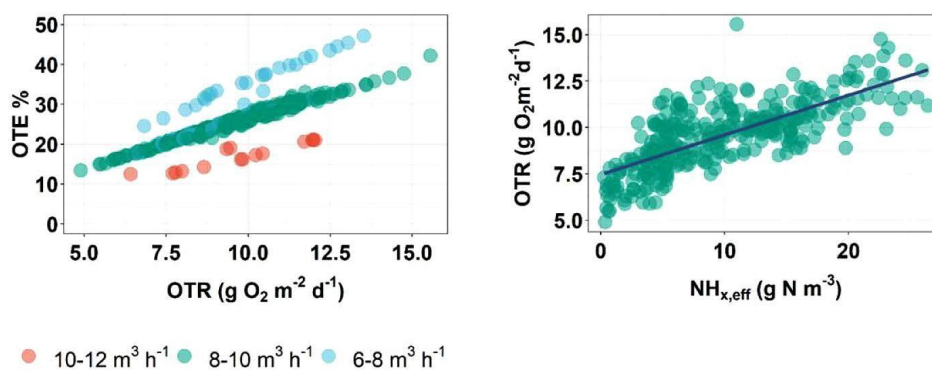
EJBY MØLLE

A VandCenter Syd (VCS), uma das maiores empresas de tratamento de água e esgoto operando na Dinamarca, estuda como intensificar as estações de tratamento de esgoto existentes de forma sustentável, com ênfase no monitoramento e na redução das emissões de GEE. Um estudo do MABR de grande escala foi realizado na estação de *Ejby Mølle* de setembro de 2019 a setembro de 2020. O projeto validou o desempenho da transferência de oxigênio do MABR e das emissões de N₂O dessa tecnologia, tanto na fase gasosa quanto na fase líquida.

A demonstração em grande escala consistiu em uma série de tanques com MABR. Cada tanque possuía um cassete individual sendo alimentado com licor misto vindo da zona anaeróbica de um sistema de EBPR existente. Sensores de NH_x, temperatura, potencial de oxi-redução (ORP) e N₂O na fase líquida foram usados para monitorar, de forma contínua, o afluente e as concentrações dos tanques, enquanto o O₂, CO₂ e N₂O de exaustão foram monitorados na fase gasosa.

Em *Ejby Mølle*, a equipe da VCS demonstrou que a concentração de amônia foi a que teve maior impacto na taxa de transferência de oxigênio no MABR. A Figura 7, ajustada de Uri-Carreño *et. al.*, mostra que a correlação entre OTE e OTR é baseada na vazão específica de ar através do lúmen da membrana. O gráfico à direita mostra uma forte correlação entre a concentração de amônia e o OTR.

Figura 7 – Esquerda: OTE contra OTR, mostrando que a relação OTR e OTE é mais dependente da vazão de ar. Direita: forte correlação entre OTR e concentração de amônia. (Uri-Carreño et. al, 2021)



O benefício na redução de GEE foi outro ponto principal da demonstração do MABR em *Ejby Mølle*. A VCS objetiva a redução de emissões de GEE das estações de tratamento e essa estação tem tratamento secundário dividido entre filtros biológicos e valos de oxidação (Uri et. al, 2020). Existem, no total, quatro valos de oxidação divididos em dois pares. Um par foi o foco do estudo de N₂O.

Durante a investigação de N₂O, a operação do valo de oxidação foi modificada, devido a alterações planejadas que estavam fora da abrangência do estudo de N₂O (Uri et. al, 2020). A transição converteu a típica operação em batelada do par de valos de oxidação para uma operação contínua em série.

O estudo concluiu que o sistema de lodos ativados tinha fator de emissão de N₂O muito variável, que foi exacerbado com as alterações de controle do processo (Uri-Carreño et. Al, 2020). O MABR manteve consistentemente baixo o fator de emissão de N₂O, que foi uma ordem de magnitude mais baixa do que o sistema de lodos ativados. A Tabela 1 resume os resultados relatados no estudo.

Tabela 1 – Comparação da produção de N₂O a partir do sistema de CAS e MABR.

	Valas de oxidação	MABR Gás de exaustão	MABR Licor misto
Produção de N ₂ O média (% de N removido)	15,37	0,47	0,77
Desvio padrão (% de N removido)	19,94	0,96	1,58

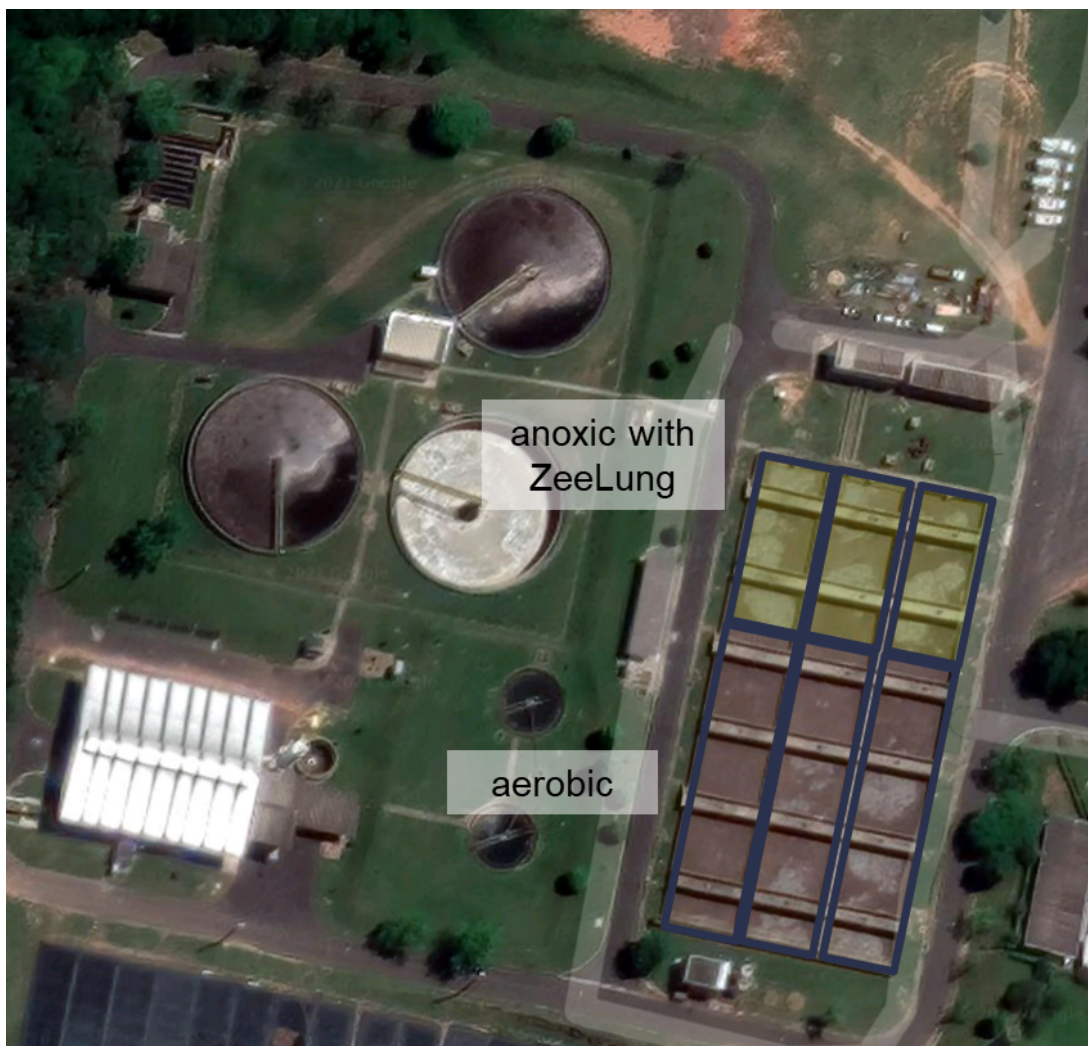
ESTUDO DE CASO NO BRASIL – CIDADE NO OESTE PAULISTA

Com o reconhecido sucesso na implementação da tecnologia globalmente, selecionou-se a ETE Limoeiro (da cidade de Presidente Prudente) – com capacidade de tratamento de até 500 L/s – para estudar um caso onde a implementação da tecnologia MABR pudesse intensificar o processo para atender às seguintes necessidades identificadas:

1. prover capacidade de remoção de amônia para atender a regulação de descarte;
2. aumentar a capacidade hidráulica para uma vazão de até 882 L/s a fim de tratar uma maior vazão devido ao crescimento populacional daquela bacia.

A ETE Limoeiro (Figura 8) é um sistema clássico de lodos ativado com aeração prolongada, com gradeamento e separação de areia, três tanques de aeração com fluxo em pistão e três decantadores. Cada reator biológico possui um volume de aproximadamente 9300 m³. Os testemunhos de operação indicam que a sedimentabilidade do lodo é insatisfatória, provavelmente devido à prevalência de condições de baixa concentração de oxigênio no sistema.

Figura 8 – Visão aérea da ETE Limoeiro mostrando o tratamento preliminar, os tanques de aeração e os três decantadores secundários. Na área hachurada em amarelo, identifica-se a zona de instalação do sistema MABR.



Enquanto a solução com tecnologia convencional clássica exigiria praticamente a duplicação da construção, os estudos usando um modelo *Lutzak-Ettinger* Modificado (LEM), de pré-desnitrificação e nitrificação sequenciais, indicaram que a adição de cassetes de MABR, no primeiro terço do reator aeróbico pistonado, permitiram agregar capacidade de nitrificação e desnitrificação simultânea. O modelo LEM indicou que a instalação da zona MABR possibilitaria à planta alcançar consistentemente concentrações de DBO₅ < 20 mg/L, NH₃-N < 3,7 mg/L e NO₃-N < 10 mg/L, superando os requerimentos exigidos para o descarte no rio Limoeiro, com uma redução estimada de consumo de energia de até 40%, se comparada à expansão com uma tecnologia convencional.

CONCLUSÕES

A tecnologia de MABR foi adotada por várias empresas, no mundo inteiro, devido à sua capacidade de entregar uma intensificação de processo sustentável. Um número crescente de instalações de grande porte provou que essa tecnologia pode realizar o *upgrade* dos sistemas de lodos ativados existentes em função de uma grande variedade de cenários desejados de tratamento, incluindo: i) possibilidade remoção biológica otimizada do fósforo-EBPR; ii) conversão do sistema de LAC para remoção de DBO₅ para um sistema de nitrificação ativo o ano todo; iii) alcançar limites mais rigorosos de descarte de efluentes para a amônia. Além disso, o MABR tem o potencial de diminuir as emissões de GEE ao reduzir o consumo de energia e as emissões de N₂O. O MABR auxilia a indústria de tratamento de águas residuais a atender aos desafios do presente e do futuro de forma sustentável, econômica e flexível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HOUWELING, D., PEETERS, J., COTE, P., LONG, Z., ADAMS, N. *Proving membrane aerated biofilm reactor (MABR) performance: results from four pilots and a full-scale*. WEFTEC, 2017.
2. HOUWELING, D., KAGANSKY, J., STOCK, G., PEETERS, J., RIEGER, L. *Exhaust gas monitoring from MABR: a new alternative for biological process control*. WEFTEC Connect, 2020.
3. MARTIN, K.J., NERENBERG, R. *The membrane biofilm reactor (MBfR) for water and wastewater treatment: principles, applications, and recent developments*. Bioresource Technology, 122, 83-94, 2012.
4. PARRAVICINI, V., SVARDAL, K., KRAMPE, J. *Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants*. Energy Procedia. 97, 246-253, 2016.
5. SYRON, E., CASEY, E. *Membrane-aerated biofilms for high rate bio-treatment: performance appraisal, engineering principles, scale-up, and development requirements*. Environ. Sci. Technol., 42(6), 1833-1844, 2008.
6. URI-CARREÑO, N., NIELSEN, P.H., ALMIND-JØGENSEN, N. *N₂O Emissions from Ejby Mølle: full-scale evaluation of conventional activated sludge and MABR N₂O emissions*. The Danish Environmental Protection Agency, 2020.
7. URI-CARREÑO, N., NIELSEN, P.H., GERNAEY, K. V., FLORES-ALSINA, X. *Long-term operation assessment of a full-scale membrane-aerated biofilm reactor under Nordic conditions*. Science of the Total Environment, 779, [146366], 2021.
8. WASEWAR, K. L. *Process intensification in wastewater treatments: basics of process intensification and inorganic pollutants*. In: *Contamination of Water*, Academic Press, 313-337, 2021.