

SANASA CAPIVARI II – O PRIMEIRO BIORREATOR DE MEMBRANA MUNICIPAL EM ESCALA NA AMÉRICA LATINA

Roverio Pagotto Jr⁽¹⁾

Gerente de projetos

Joubert Trovati⁽²⁾

Líder de engenharia

Marcus Vallero⁽³⁾

Gerente de vendas

Brian Arntsen⁽⁴⁾

Líder de vendas

Michael Odam⁽⁵⁾

Líder comercial

Endereço⁽¹⁾: Avenida da Saudade, 500 – Bairro: Ponte Preta – Campinas – SP – CEP: 13041-903 – Brasil – e-mail: roverio@sanasa.com.br; opera.esgoto@sanasa.com.br; tratamento.esgoto@sanasa.com.br

RESUMO

A macro região de Campinas desenvolve-se rapidamente, com novas áreas urbanas e parques industriais, o que traz o desafio de promover novas técnicas para tratar efluentes com qualidade para reúso, contribuindo na superação dos problemas de escassez de água. Para responder a esse desafio, a SANASA (concessionária pública de água e esgoto da cidade) construiu recentemente a EPAR (Estação de Produção de Água de Reúso) Capivari II, baseada na tecnologia de membranas UF ZeeWeed 500D® da Veolia. Essa é a primeira planta MBR de grande porte da América Latina, com tratamento biológico a nível terciário (remoção de nitrogênio e fósforo), capaz de tratar uma vazão média de 182 L/s em sua primeira fase de construção. O sistema de ultrafiltração é composto por 3 trens de membranas com mais de 36.000 m² de área total. A planta foi comissionada em abril de 2012 e a qualidade do efluente tratado supera as expectativas, com eficiência de remoção de DQO superior a 97% e concentrações de DBO5 e NH3 abaixo dos níveis de detecção, com turbidez < 0,3 NTU. O efluente tratado é enviado a um tanque de acúmulo de água de reúso e, atualmente, é lançado no rio Capivari.

PALAVRAS-CHAVE: MBR de Grande Porte, efluente doméstico, remoção de nutrientes

1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, a água está se tornando uma *commodity* estratégica, sendo um recurso natural escasso e valioso. As comunidades tornaram-se mais conscientes das consequências do lançamento indiscriminado de efluentes e das implicações que surgem devido à escassez de água. O tratamento de efluentes a um nível que atenda padrões de lançamentos rigorosos – ou até a uma qualidade que possa ser reusada – tornou-se chave para as concessionárias de água. A adoção de tecnologias estado-da-arte para o tratamento de efluentes é particularmente importante em áreas como o estado de São Paulo, onde a demanda por água potável continua aumentando, o que aumenta a necessidade de geração de água de fontes alternativas, como o reúso de água.

Este é o caso da cidade de Campinas (localizada a 100 km da cidade de São Paulo), uma cidade dinâmica com mais de 1.000.000 habitantes. Como a macro região de Campinas continua se desenvolvendo com novas áreas urbanas e parques industriais, as comunidades podem enfrentar os seguintes problemas:

- As estações de tratamento existentes são distantes de novos desenvolvimentos urbanos e industriais.
- O efluente tratado é lançado a um corpo d'água sensível, de modo que a redução no lançamento de nutrientes e patógenos se tornará um requerimento crítico.
- Os mananciais de águas são escassos, de modo que as iniciativas de redução do consumo de água e promoção do reúso de água são necessárias.
- Soluções robustas, automatizadas e confiáveis são requeridas pelo time de operações.

Para endereçar essas questões, em um esforço para prover cobertura total a serviços de saneamento para a cidade de Campinas, a SANASA (concessionária pública) recentemente concluiu a EPAR Capivari II, sendo a primeira planta MBR de grande porte para tratamento de esgoto municipal da América Latina (Fig. 1). Essa planta tratará o esgoto doméstico de uma população de 350.000 habitantes após a conclusão de todas as fases de construção. A engenharia básica e de detalhamento foi realizada pela EMA - Engenharia de Meio Ambiente e o fornecimento de equipamentos, construção, instalação e comissionamento foram executados por um consórcio formado entre a Construtora Norberto Odebrecht e a Veolia Water Technologies & Solutions (antiga SUEZ WTS).

Figura 1 – Visão aérea da EPAR Capivari II da Sanasa, localizada em Campinas, Brasil.



Ainda que a implantação da tecnologia MBR para o tratamento de efluentes seja relativamente recente no Brasil, trata-se de uma tecnologia utilizada extensivamente há muitos anos na América do Norte, Europa e Ásia. Nas últimas duas décadas, a tecnologia MBR tem crescido exponencialmente por causa das reconhecidas vantagens que oferece, em comparação aos processos de tratamento convencionais, tais como: menor uso de área, melhor qualidade dos efluentes tratados (adequada para o reúso direto) e melhor controle de processo (Buer & Cumin, 2010). Estima-se que a demanda por sistemas MBR continue a aumentar anualmente (crescimento de mais de dois dígitos), ao longo da próxima década, devido às regulações cada vez mais rigorosas e à enorme demanda por água de reúso (Cote et al., 2012).

Este artigo apresenta informações sobre o projeto, a partida, a operação e o desempenho da EPAR Capivari II, com especial atenção às recomendações de projeto e operação para a geração de efluente de alta qualidade e seu potencial reúso.

2. SISTEMA MBR COM MEMBRANAS DE UF DE FIBRA OCA – EPAR CAPIVARI II

O sistema MBR pode ser definido como a combinação de uma operação de ultrafiltração (UF) com o processo de lodos ativados. A membrana de UF imersa ZeeWeed® 500D é o elemento filtrante desse sistema, que tem as seguintes características:

- Essa membrana é do tipo fibra oca e montada em uma estrutura retangular de feixes de membranas (Fig. 2.1), imersa diretamente no licor misto de um reator aeróbio, conectado à linha de sucção de uma bomba de deslocamento positivo. Sob uma sucção de 20-55 kPa, a água tratada (permeado) é transportada através dos poros da membrana "de fora para dentro" para o centro oco de cada fibra.

Figura 2.1 – Vista do cassete de membranas ZeeWeed® 500D instalado na EPAR Capivari II.



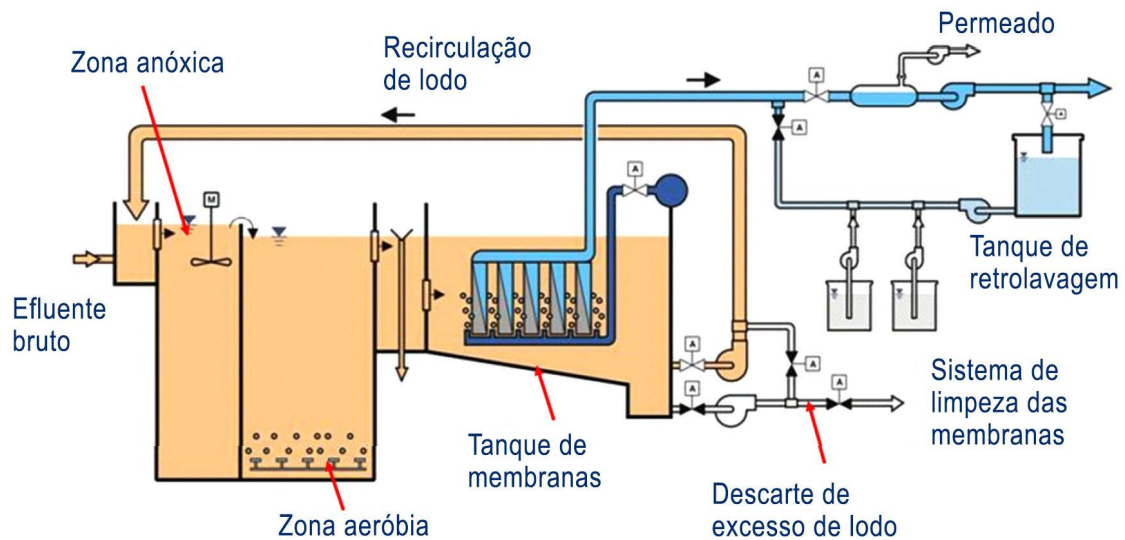
- A membrana de UF tem um tamanho de poro nominal de 0,04 μm e rejeita todos os sólidos suspensos e coloidais, incluindo bactérias e a maioria dos vírus. Sólidos maiores do que o tamanho nominal do poro – incluindo as bactérias presentes no lodo biológico – não passam pelos poros e permanecem do lado de fora da fibra oca.
- A membrana de fibra oca é, na verdade, um compósito, sendo que a membrana permeável em si é depositada em um fio estrutural. Essa construção confere alta durabilidade ao elemento filtrante, resultando, quando bem operada, em uma vida de membrana superior a 10 anos (Cote et al, 2012).

Como os sólidos são completamente separados pela membrana, não há necessidade de sedimentação do lodo em decantadores que, por sua vez, traz os seguintes benefícios:

- O sistema MBR opera com concentrações de lodo de 8-10 gSST/L. Essa concentração é quase 3 vezes maior do que em um sistema de lodos ativados convencional e, portanto, os volumes de reator biológicos requeridos são cerca de um terço, se comparados a um sistema convencional.
- Sistemas MBR são mais robustos no tratamento de efluentes com altas variações de vazão e/ou de concentração (devido a descargas industriais para as tubulações de esgoto), uma condição que causa sérios problemas em um sistema convencional.

As membranas de UF são instaladas em tanques de membrana e conectadas ao biorreator através de bombas de fluxo axial. Os poluentes do efluente são biodegradados no biorreator e o licor misto é continuamente recirculado para os tanques de membrana (Fig. 2.2). A vazão bombeada do biorreator aos tanques de membrana é de 5 vezes a vazão média, e retorna por gravidade para o início do trem biológico. Essa recirculação vigorosa evita a acumulação dos sólidos no tanque de membranas, criando uma biomassa mais uniforme. A vazão de efluente permeado pelas membranas é ajustada em função da vazão de entrada do sistema e do nível dos biorreatores, de modo a manter o sistema em equilíbrio. Sopradores de membrana dedicados fornecem ar (bolhas grossas) para limpar as membranas. O ar é introduzido ciclicamente na parte inferior de cada módulo de membrana, produzindo uma vigorosa turbulência que varre a superfície externa das fibras ocas e desloca os sólidos rejeitados das superfícies das membranas.

Figura 2.2 – Esquema genérico de um sistema MBR¹



3. EPAR CAPIVARI II – PROJETO DO SISTEMA MBR

Um pré-tratamento adequado, incluindo o peneiramento fino, é essencial para uma operação estável e de longo termo de um sistema MBR que trata esgoto doméstico. Seleção e instalação criteriosa do peneiramento não devem ser negligenciadas, principalmente sabendo que o custo desse peneiramento representa menos de 3% do total do investimento de uma instalação MBR (Cote et al., 2006). No projeto SANASA Capivari II, o pré-tratamento é composto por um gradeamento (espaçamento entre barras de 15 mm), seguido por uma peneira de tambor rotativo instalada em um canal e com uma malha perfurada (2,0 mm). O efluente peneirado flui para uma calha Parshall, a fim de registrar a vazão de entrada, e passa por caixas separadoras de areia antes do encaminhamento para os biorreatores. A operação dessas unidades de pré-tratamento tem gerado, com sucesso, um efluente livre de detritos, cabelos, fiapos e areia, que são componentes potencialmente prejudiciais para o desempenho do sistema de membranas.

Em sua primeira fase, a planta foi concebida para tratar uma vazão média de 182 L/s e uma vazão de pico horário de 294 L/s. O sistema biológico é composto por um conjunto de zona de deoxigenação (DeOx), zona anaeróbia, zona anóxica e zona aeróbia (Tabela 1), sendo o primeiro sistema de membranas de grande porte no Brasil a contar com capacidade de tratamento terciário totalmente biológico, projetado para remover fósforo e nitrogênio.

Tabela 1 – Sumário do volume e tempo de retenção hidráulica de cada zona do reator biológico para a planta EPAR Capivari II.

	Volume do tanque (m ³)	Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) à vazão média (h)
Zona de Deoxigenação	720	1,1
Zona Anaeróbia	1.685	2,6
Zona Anóxica	1.685	2,6
Zona Aeróbia	4.278	6,5

A zona de deoxigenação recebe o licor misto que retorna de tanques de membrana por gravidade. Como os tanques são aerados para controlar a incrustação nas membranas (concentrações de oxigênio dissolvido em torno de 5 mg/L), a zona de deoxigenação traz o benefício de esgotar o oxigênio dissolvido antes do licor misto ser

¹ Este sistema contém o biorreator, o tanque de membrana e equipamentos associados: bombas, sopradores e equipamentos de limpeza de membrana. Especificamente para o projeto EPAR Capivari II, as bombas de recirculação de lodo são instaladas antes dos tanques de membrana (projeto *Pump-To*).

misturado ao efluente na entrada da zona anaeróbia. Na zona anaeróbia, são fornecidas condições para a fermentação da matéria orgânica pelas bactérias acetogênicas que, por sua vez, favorecem o crescimento de organismos acumuladores de fósforo (PAOs) sob condições específicas. O efluente avança, então, para a zona de desnitrificação, onde bactérias heterotróficas reduzem o nitrato para gás nitrogênio, resultando na remoção do nitrogênio. O carbono orgânico e a amônia, não oxidados nos sistemas biológicos anteriores, são consumidos na zona aerada, completando assim os bioprocessos necessários para a remoção biológica de carbono, nitrogênio e fósforo.

Após fluir pelo sistema biológico, o licor misto é bombeado para os três trens de membrana (Fig. 3). Cada trem de membrana possui 8 cassetes de membranas VWTS ZeeWeed® 500D, com mais de 36.000 m² de área de superfície de membranas (Tabela 2).

Tabela 2 – Sumário do sistema de membranas para a planta EPAR Capivari II.

Número de trens de membrana	3
Número de cassetes por trem	8
Número de espaços de cassetes por trem	10
Número total de cassetes instalados	24
Número total de módulos ZeeWeed 500D instalados	1.152
Total de área superficial de membrana	~ 36.400 m ²
Concentração de lodo no sistema biológico	Até 10.000 mgSST/L
Concentração de lodo no tanque de membranas	Até 12.000 mgSST/L
Dimensões do tanque de membranas (C x L x A)	10,0 m x 6,4 m x 3,3 m (útil)

Os trens de membrana foram projetados para um funcionamento independente. Cada trem de membrana dispõe de equipamentos dedicados, incluindo bomba de permeado/retrolavagem e bombas de recirculação de lodo, sopradores, sistema de escorva, além de toda a instrumentação e controles necessários, incluindo turbidímetros de faixa baixa para o monitoramento contínuo da qualidade do permeado. Portanto, mesmo quando um trem é retirado de operação, por exemplo, para limpeza, os outros dois trens são capazes de tratar a totalidade da vazão de entrada. Uma bomba comum para a drenagem dos tanques, uma bomba de descarte de lodo de excesso e o sistema de limpeza química da membrana de lodo completam os acessórios pertencentes à unidade de UF.

Figura 3 – Visão dos três trens de membrana na planta EPAR Capivari II.



O efluente, tratado e filtrado pelas membranas, é enviado para um tanque intermediário, que transborda para um tanque de acumulação antes de sua descarga para o rio Capivari. A planta é controlada por um controlador lógico programável (CLP) da Veolia WTS – *PAC Systems RX3i* – com placas de I/O de alta velocidade e interface homem-máquina (IHM). O software SCADA baseia-se no sistema *Veolia WTS Proficy Process System®* com um historiador industrial para o armazenamento dos dados e do histórico da operação da planta.

4. OPERAÇÃO DA PLANTA E PERFORMANCE

PARTIDA DA PLANTA

A planta MBR começou, em abril de 2012, tratando cerca de 30–50 L/s de esgoto doméstico produzido na região centro-oeste da cidade de Campinas. O sistema biológico foi inoculado com cerca de 300 m³ de lodo aeróbio de um sistema de lodos ativados convencional da SANASA. Para proteger as membranas da presença de materiais fibrosos e outros detritos, o lodo de inóculo foi lançado no canal antes do peneiramento fino, promovendo a remoção de qualquer material potencialmente prejudicial para as membranas.

O crescimento de lodo foi acompanhado e controlado para manter-se próximo da taxa de carregamento recomendada para as bioconversões. A partida do processo procedeu com sucesso e a concentração de lodo foi mantida em valores baixos em torno de 3–4 g/L, beneficiando-se, desta feita, com um menor consumo de energia para aeração de processo. Apesar de o sistema MBR poder operar com concentrações de lodo mais altas (em torno de 10 g/L no biorreator), atualmente procura-se operar o sistema buscando a diminuição do consumo de energia (menor concentração de lodo no sistema), sem penalizar o desempenho da planta.

Somente um trem de membrana operou durante os primeiros meses de operação, enquanto os outros dois trens permaneceram em *stand-by*; porém, ainda alternando a operação dos trens, de modo que todos eles entraram em operação e passaram pelas limpezas de manutenção rotineiras.

DESEMPENHO DO SISTEMA MBR

A tabela 3 sumariza as características do afluente e do efluente tratado pelo sistema MBR, bem como as taxas de remoção global. Os resultados analíticos do esgoto bruto e do efluente tratado correspondem à operação do sistema MBR no período de abril até outubro de 2012.

Tabela 3 – Sumário da qualidade da alimentação e do permeado para a planta EPAR Capivari II.

Parâmetro	Alimentação (esgoto bruto)		Permeado (efluente tratado)		Remoção Média (%)
	Faixa	Média	Faixa	Média	
DQO (mg/L)	650 – 770	725	17 – 30	23,4	96,9
DBO ₅ (mg/L)	324 – 390	360	0,5 – 2	0,92	99,8
NTK (mg/L)	66 – 96	83	0,01 – 1,80	0,74	98,6
NH ₃ -N (mg/L)	32 – 69	54	0,01 – 0,29	0,15	99,7
TN-N (mg/L)	68 – 97	85	4,5 – 6,9	5,3	93,8
NO ₃ -N (mg/L)	1,0 – 2,1	1,9	2,1 – 5,3	3,9	-
Fósforo total (mg/L)	8,2 – 10,0	9,1	0,98 – 7,35	3,05	73,0
SST (mg/L)	276 – 332	307	0,6 – 2,0	1,1	99,7
Turbidez (NTU)	–	–	0,18 – 0,28	0,23	-
Coliformes Fecais (NMP/100 mL)	–	–	< 2,0	< 2,0	-

Os resultados demonstram que o permeado gerado é de excelente qualidade, consistentemente. As concentrações de DBO₅ do permeado ficaram abaixo de 1 ppm na vasta maioria do tempo, demonstrando, portanto, a capacidade do sistema MBR de promover a remoção plena da poluição carbonácea biodegradável. A remoção completa de DBO₅ indica que a concentração de DQO média do permeado de 23 mg/L é predominantemente de natureza não biodegradável e, presumivelmente, com baixo impacto – se houver – no corpo receptor (rio Capivari).

No que diz respeito à remoção de compostos nitrogenados, os resultados mostraram que o sistema MBR excedeu as expectativas, pois a eficiência de remoção de NTK, NH₃ e nitrogênio total foram muito elevadas, mesmo se observado que as concentrações de nitrogênio na entrada foram surpreendentemente elevadas (para esgoto doméstico), registrando-se concentrações de NTK na entrada de até 96 mg/L. A alta eficiência da remoção de nitrogênio total pode ser atribuída a vários fatores: (i) as altas taxas de recirculação de lodo (4–7 Q) que são normalmente aplicadas na concepção MBR; (ii) a vazão de entrada no período foi baixa, se comparada à vazão de projeto, de modo que a carga de matéria nitrogenada real era mais baixa do que os valores consideradas no projeto (mesmo operando o sistema com uma concentração mais baixa de lodo); (iii) a zona anaeróbia também funciona como uma zona anóxica, que aumenta ainda mais o volume de reação para a atividade das bactérias heterótrofas desnitrificantes; (iv) a temperatura mais alta do licor misto durante o período estudado. A elevada eficiência da desnitrificação que foi observada, como indicado pelas baixas concentrações de nitrato no permeado (Tabela 3), também trouxe como benefício a elevada recuperação da alcalinidade, o que resultou em uma importante economia nos custos de operação. Durante todo o período de operação relatado neste artigo, não foi necessário dosar soda cáustica ou qualquer outra fonte de alcalinidade, com a alcalinidade do permeado tipicamente superior a 60 mgCaCO₃/L.

A eficiência da remoção de fósforo variou muito no período deste estudo, e os valores de fósforo total do permeado variaram de 0,98 a 7,35 mg/L (Tabela 3). Essa ampla variação indica que as condições necessárias para o crescimento dos PAOs não foram plenamente garantidas. De fato, sabe-se que a remoção biológica de fósforo é um processo sensível que pode ser afetado por vários fatores, tais como: características dos efluentes, temperatura, presença de oxigênio dissolvido e valor do pH (Metcalf & Eddy, 2002). No caso específico da planta MBR Capivari II, os motivos para a instabilidade na remoção de P, por via biológica, podem ser relacionados com a presença de nitratos na zona anaeróbia.

Uma das condições para o crescimento dos PAOs é a necessidade de assimilar acetato para produzir polihidroxibutirato (PHB) intracelular, com libertação concomitante de ortofosfato O-PO₄ (Metcalf & Eddy, 2002). Esse acetato é produzido pela fermentação de matéria orgânica presente no esgoto bruto. No entanto, o acetato também é o substrato perfeito para as bactérias heterotróficas desnitrificantes. À medida que o licor misto flui para a zona anaeróbia com alta carga de nitrato, acreditamos que o acetato produzido é facilmente consumido pelas bactérias desnitrificantes. Em outras palavras, as bactérias desnitrificantes provavelmente superaram as PAOs na competição pelo consumo do acetato, contribuindo, por sua vez, na diminuição da remoção de fósforo pela via biológica.

No caso dessa hipótese sobre a presença de nitratos na zona anaeróbia ser, de fato, prejudicial para a remoção biológica do fósforo, pode-se considerar a implementação de uma segunda linha de recirculação de lodo, promovendo a recirculação do licor misto do fim da zona aeróbia de volta ao início da zona anóxica. Essa segunda linha de recirculação de lodo permitiria a remoção de nitrato, até uma determinada concentração, no tanque de membranas que, ao atingir a zona anaeróbia, não seria prejudicial para o crescimento das PAOs. De qualquer modo, um sistema de dosagem de coagulante, para a redução química do fósforo, será implementado na fase II do projeto, o que permitirá a manutenção de concentrações muito baixas de fósforo no permeado, independentemente da sensibilidade do processo de remoção biológica do fósforo.

Os resultados da remoção de coliformes fecais também foram excelentes, com uma concentração de coliformes fecais < 2 MPN/100 mL para o permeado do MBR. A excelente remoção de bactérias e vírus que pode ser alcançada com as membranas ZeeWeed® 500D, assim como os valores de turbidez consistentemente < 0,3 NTU e completamente livres de odor, demonstram inequivocamente o desempenho superior dos sistemas MBR em comparação com outros sistemas convencionais de tratamento. As características do permeado (Tabela 3) superam os padrões de qualidade requeridos para diversos usos domésticos e industriais, como a *make-up* de torres de resfriamento, e para fins de limpeza. Além do evidente benefício da proteção ambiental, a geração consistente de água de reúso de alta qualidade, pela planta EPAR Capivari II, oferece oportunidades de receita adicional.

O desempenho das membranas manteve-se dentro das especificações durante todo o período estudado. A permeabilidade permaneceu em valores em torno de 450 (L/m²/h)/bar durante os primeiros oito meses de operação, sendo que este valor de permeabilidade é próximo dos valores de partida do sistema (membranas novas). As limpezas químicas com hipoclorito de sódio (para combater incrustação biológica) e ácido cítrico (para combater incrustação inorgânica) foram regularmente – e automaticamente – executadas, de modo que a

reconhecida excelência da SANASA na operação e manutenção das plantas será provavelmente recompensada com uma vida útil estendida para as membranas, reduzindo os custos do ciclo de vida do sistema.

5. CONCLUSÕES

A operação robusta e confiável do primeiro MBR de grande porte no tratamento de esgoto doméstico, na América Latina, coloca a SANASA na vanguarda do setor de saneamento da região. A planta MBR produziu um efluente tratado com concentrações de DQO consistentemente inferiores a 30 mg/L, com concentrações de DBO5 e de NH3-N abaixo dos níveis de detecção e com turbidez inferior a 0,3 NTU sem odores desagradáveis. A excelente qualidade do permeado, e a operação confiável da planta MBR, demonstram claramente a viabilidade técnica e econômica desse sistema para o tratamento de esgoto sanitário. O foco da SANASA no planejamento, execução e treinamento de pessoal foram fundamentais para o sucesso do projeto, o que pode abrir caminho para uma maior implementação de sistemas MBR modernos na América Latina.

O permeado tratado atende os padrões comumente utilizados para diversos usos industriais e domésticos, oferecendo a oportunidade de reduzir a demanda de água dos mananciais através da implementação do reúso de água como, por exemplo, no parque industrial de Campinas. O efluente tratado está sendo atualmente lançado no rio Capivari, com impacto positivo na qualidade do corpo receptor de água.

Os custos operacionais podem ser mantidos baixos com uma gestão otimizada da concentração do lodo no biorreator (ajustando o inventário de lodo à carga real de poluentes) e por uma remoção otimizada do nitrogênio, o que diminui ou mesmo evita a necessidade de dosagem de agentes alcalinos (como observado neste primeiros 8 meses de operação), demonstrando que o MBR é um sistema economicamente competitivo para a geração de água de alta qualidade.

Por fim, profissionais treinados têm operado a planta de UF de acordo com as melhores práticas recomendadas pelo fornecedor das membranas, como indicado pela elevada permeabilidade do sistema de membranas – 450 (L/m²/h)/bar – após 8 meses de operação. A operação apropriada e a execução do programa de manutenção provavelmente serão recompensadas com uma vida útil estendida para as membranas. A EPAR Capivari II é um sucesso – tanto operacionalmente quanto sob o ponto de vista do desempenho – mostrando que o uso de membranas de fibra oca, no coração do sistema MBR, foi a escolha certa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BUER, T. E CUMMIN, J. *MBR module design and operation*. *Desalination*, 250, 1073–1077, 2012.
2. COTE, P.; ALAM, A. E PENNY, J. *Hollow fiber membrane life in membrane bioreactors (MBR)*. *Desalination*, 288, 145–151, 2012.
3. COTE, P.; BRINK, D. E ADNAN, A. *Pretreatment requirements for membrane bioreactors*. In: *Weftec Proceedings 2006*, 1846–1855, 2006.
4. METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. McGraw-Hill, 4th ed, 2002.