

II-088 – AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DE UM BIORREATOR A MEMBRANA

Leonardo Dalri-Cecato⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina. Mestre em Engenharia Ambiental (PPGEA/UFSC). Doutorando em Engenharia Ambiental (PPGEA/UFSC).

André Aguiar Battistelli

Graduado em Engenharia Ambiental. Doutor em Engenharia Ambiental.

Flávio Rubens Lapolli

Doutor em Hidráulica e Saneamento. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

Endereço⁽¹⁾: Campus Universitário UFSC - Trindade - Dep. Engenharia Sanitária e Ambiental – Laboratório de Reúso de Águas (LaRA) - 3º andar - Florianópolis/SC. CEP: 88040-490. Tel: (48) 3721-7750. leonardo.dalri@gmail.com

RESUMO

A principal discussão levantada quanto à aplicação em larga escala dos biorreatores a membrana no tratamento de efluentes está relacionada não à sua eficiência, mas sim aos dispêndios envolvidos tanto na sua implantação quanto operação. Porém, informações sobre os custos desta tecnologia são geralmente reportadas de forma inconsistente, desuniforme e sem periodicidade, afetando negativamente a sua credibilidade e a quantificação dos seus impactos econômicos. Nesse contexto, o presente trabalho consistiu na aplicação da metodologia de avaliação de custo de ciclo de vida para avaliar os custos de implantação de um biorreator a membrana projetado para ser implementado em Santa Catarina/Brasil, dimensionado para tratar $6.060 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ (50.000 hab), visando a produção de água de reúso. O levantamento do CAPEX abordou os dispêndios com a aquisição de membranas, compra de área e construção civil, resultando em valores estimados equivalentes a $3.363,08 \text{ R}\$. \text{m}^3\text{d}^{-1}$ ou $407,61 \text{ R}\$. \text{hab}^{-1}$ para a instalação da estação de tratamento de esgotos proposta, os quais vão ao encontro de outros estudos realizados abordando custos de biorreatores a membrana.

PALAVRAS-CHAVE: Biorreator a Membrana, Custo, ACCV, CAPEX, Reúso, Esgotos Sanitários.

INTRODUÇÃO

A tecnologia de biorreatores a membrana (BRM) é dada pela combinação do processo clássico de tratamento de efluentes, via lodos ativados convencional, com o processo físico de separação por membranas (JUDD, S.; JUDD, 2011). A utilização dos BRM traz vantagens relacionadas à alta qualidade do efluente gerado e consequente possibilidade de se realizar reúso, bem como, a possibilidade de operação com elevado teor de sólidos em suspensão e maiores idades de lodo, resultando na redução da produção de lodo de descarte e da área construída requerida (KOOTENAEI; AMINIRAD, 2014; LE-CLECH, 2010; METCALF; EDDY, 2003).

Entretanto, apesar das vantagens reportadas, Judd (2017) comenta que a principal discussão levantada quanto à aplicação dos BRM no tratamento de efluentes está relacionada não à sua eficiência, mas sim aos custos nela envolvidos. O autor também comenta que, dentre as diversas maneiras de se levantar e categorizar os custos atrelados a um empreendimento, a separação entre os valores de implantação (CAPEX - *Capital Expenditure*) e operação (OPEX - *Operational Expenditure*) costuma ser utilizada. Tais informações são comumente confrontadas com dados econômicos da tecnologia de lodos ativados, facilitando análises comparativas (IGLESIAS et al., 2017; JUDD, S. J., 2017; YOUNG, T et al., 2012).

Nesse viés, uma das ferramentas aplicáveis para auxiliar na contabilização dos custos de tecnologias de cunho ambiental é a Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV), conforme realizado por Dhillon (2010), o qual aplica ACCV para uma estação de tratamento de resíduos, além de Koul e John (2015) e Bhoje, Saner e Aher (2016), os quais abordam aplicações em estações de tratamento de esgotos. No âmbito dos biorreatores a

membrana, Dalri-Cecato et al. (2009) aplicaram esta metodologia para realizar o levantamento dos custos de operação de um BRM, considerando a sua implantação no estado de Santa Catarina/Brasil.

O número de pesquisas científicas relacionadas ao levantamento de custos de BRM vai ao encontro da carência de dados econômicos ao seu respeito. Judd (2017) realizou um estudo bibliométrico acerca dos principais temas abordados em pesquisas relacionadas aos BRM e identificou que apenas 0,5% dos trabalhos publicados entre 2001 e 2016 abordaram temáticas mercadológicas e de custos. Além disso, as informações existentes sobre custos de biorreatores a membrana são reportadas de forma inconsistente, desuniforme e sem periodicidade (JUDD, S. J., 2017; PIRANI et al., 2012). Dessa forma, entende-se que a falta de credibilidade e disponibilidade deste tipo de dado é prejudicial para a atestar a viabilidade econômica desta tecnologia (VERRECHT et al., 2010).

Portanto, é necessário expandir o conhecimento acerca dos BRM, unindo estudos referentes à sua eficiência e operação com pesquisas que considerem a viabilidade econômica de implantação em escala real para diferentes situações e localidades. No contexto brasileiro, pesquisas deste cunho são escassas, e uma maior ênfase nessa área do conhecimento auxiliaria, por exemplo, na tomada de decisão acerca do tipo de tratamento de esgoto aplicado em determinada situação, bem como no aumento de estações produtoras de água de reúso (EPAR), as quais se apresentam como uma alternativa interessante frente às crises hídricas atuais.

OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho consistiu no levantamento e discussão de dados de CAPEX de um BRM projetado para ser implantado no estado de Santa Catarina/Brasil, visando a produção de água de reúso.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada nesta pesquisa seguiu os princípios apresentados por Dalri-Cecato et al. (2019). Os tópicos a seguir apresentam os critérios utilizados na concepção e no levantamento dos custos de implantação do biorreator a membrana avaliado.

BIORREATOR A MEMBRANA AVALIADO

A simulação de custos foi realizada sobre um BRM aeróbio projetado para operar em regime de fluxo contínuo, localizado no estado de Santa Catarina/Brasil, atendendo uma população de 50.000 pessoas. Escolheu-se trabalhar com módulos de membranas submersos em tanque de filtração separado do sistema biológico. Segundo Metcalf e Eddy (2014), esta prática tem sido mais utilizada, uma vez que o volume do tanque de filtração é bastante reduzido, permitindo atingir turbulências superiores no meio líquido com uma mesma taxa de aeração, propiciando um melhor controle da colmatação e maior eficiência energética. Além disso, nesse tipo de configuração é possível realizar limpezas nas membranas com maior facilidade, sem comprometer diretamente o tratamento biológico. Considerou-se a implantação de uma etapa de pré-desnitrificação no projeto, com o intuito de promover a redução da concentração de nitrogênio total no efluente final da ETE e evitar a multiplicação de algas e macrófitas aquáticas, as quais podem levar à incrustações, colmatação do solo e outros impactos no local de despejo ou reúso do efluente produzido (MARECOS; ALBUQUERQUE, 2010; VON SPERLING, M, 2005).

Além disso, optou-se pela implantação de um tanque de equalização no sistema, uma vez que vazões de pico elevadas afetam diretamente o projeto e custos da ETE, tendo em vista que para suprir grandes variações de vazão é necessário instalar mais módulos de membranas e demais equipamentos, levando a maiores custos de implantação e operação (METCALF; EDDY, 2014; VERRECHT et al., 2010). Nesse contexto, Judd e Judd (2011) indicam uma redução de 21% no custo geral do sistema com a utilização de tanque de equalização, devido à redução de 20% no custo de operação e aumento de 22% na utilização média da estação.

A Figura 1 apresenta um esquema do sistema proposto.

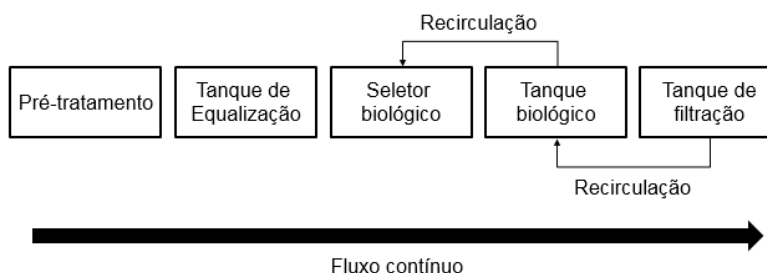


Figura 1: Esquema do sistema proposto.

LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DO BRM

Conforme comentado previamente, a análise de custo de ciclo de vida (ACCV) é um método utilizado para avaliar os dispêndios importantes ao longo do tempo de vida de um projeto ou produto, incluindo os custos de operação (KUBBA, 2010).

Diante disso, a metodologia ACCV foi utilizada para basear o levantamento do CAPEX do BRM proposto, tendo em vista que esta é uma ferramenta importante para introduzir a visão econômica na tomada de decisão acerca de projetos de cunho ambiental, podendo ser aplicada em estações de tratamento de esgoto (REBITZER; HUNKELER; JOLLIEP, 2003).

Uma vez que a análise de custos é específica para cada situação e pode variar conforme o local do empreendimento, variações cambiais, momento econômico, dentre outros fatores, os modelos e considerações feitas por Dhillon (2010), Koul e John (2015), e Bhoje, Saner e Aher (2016) foram adaptados para contemplar a situação em questão.

CÁLCULO DO CAPEX

O levantamento do CAPEX do BRM proposto considerou os principais contribuintes para o custo de instalação de biorreatores a membrana, caracterizados pela compra de área (JUDD, S. J., 2017; YOUNG, T et al., 2012), aquisição de membranas (JUDD, S. J., 2017), além dos gastos relacionados à construção civil (YOUNG, THOR et al., 2013), conforme apresentado na Equação 1.

$$\text{CAPEX} = M + A + CC \quad \text{Equação (1)}$$

Em que,

M é o custo relativo à aquisição de membranas;

A é o custo relativo à compra de área;

CC é o custo relativo à construção civil.

• CUSTO RELATIVO À AQUISIÇÃO DE MEMBRANAS

É possível obter dados de custo de membranas na literatura. Contudo, este é um parâmetro que sofre variação conforme o fabricante, concorrência entre empresas, dentre outras questões mercadológicas. Tendo isso em vista, realizou-se o contato direto com o fornecedor para levantar o custo envolvido na compra dos módulos e cassetes de membrana. Além disso, foi considerado um custo de instalação das membranas igual a 10% do seu valor de compra (YOUNG, THOR et al., 2013).

Os impostos envolvidos nessa transação também foram somados aos custos de aquisição das membranas. Atualmente, há quatro impostos incidentes sobre produtos importados no Brasil: imposto de importação (II),

imposto sobre produtos industrializados (IPI), programa de integração social (PIS) e contribuição para fins sociais (Cofins).

As membranas filtrantes (exceto aquelas aplicadas à osmose inversa) se enquadram na Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM) número 84219999. Considerando esta NCM, foi utilizado o Simulador do Tratamento Tributário e Administrativo das Importações disponibilizado pela Receita Federal brasileira (BRASIL, 2018b), o qual apresenta as alíquotas e tributos referentes aos impostos supracitados para diferentes produtos. Além disso, considerou-se o imposto sobre circulação de mercadorias e serviços (ICMS) para o estado em questão (SANTA CATARINA, 1996).

A soma do valor de compra das membranas, instalação e impostos aplicados resultou no valor final relativo à aquisição das membranas filtrantes para o BRM proposto.

• CUSTO RELATIVO À COMPRA DE ÁREA E CONSTRUÇÃO CIVIL

Os dados referentes à compra de área e construção civil necessários para a implantação da ETE em questão foram coletados nas séries históricas e estatísticas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os dados mensais de 2018 disponíveis para Santa Catarina foram compilados e a média aritmética foi retirada para o parâmetro Custo médio do m², caracterizando o custo relativo à compra de área, além dos parâmetros Custo médio m² em moeda corrente (Componente material e Componente mão de obra), cuja soma constituiu o custo relativo à construção civil.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MÓDULO DE MEMBRANAS ESCOLHIDO

O módulo de membranas escolhido para compor o BRM proposto foi o Zeeweed 500D-370 da empresa Suez Water Technologies & Solutions, de conformidade fibra oca, com fluxo de fora para dentro, indicado especificamente para o uso em BRM. Esta decisão baseou-se na facilidade de contato e troca de informações com a empresa, bem como no seu respaldo, tanto frente ao mercado, como dentre a comunidade acadêmica.

Segundo Cote, Alam e Penny (2012), membranas do tipo fibra oca são aplicáveis para todas as faixas de vazões, e estimam que 75% da capacidade total instalada de BRM empregam esse tipo de membrana. Os autores avaliaram a evolução da tecnologia Zeeweed, aplicada também no BRM objeto deste estudo, realizando a primeira análise de previsão de tempo de vida útil de membranas filtrantes com base em uma série de dados históricos disponibilizada por um fornecedor.

As principais características do módulo de membranas escolhido são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características do módulo de membranas Zeeweed 500D-370.

Parâmetro	Valor
Material	PVDF
Tamanho nominal de poro (µm)	0,04
Comprimento (m)	0,049
Altura (m)	2,198
Largura (m)	0,844
Volume (m ³)	0,091
Área filtrante (m ²)	34,4

Fonte: SUEZ (2016)

Tendo em vista a organização dos módulos dentro do tanque de filtração, foi prevista a aplicação do Cassete 48M, da mesma empresa, no qual é possível alocar até 48 módulos de membranas. Além disso, os componentes

necessários para realizar a distribuição da aeração da membrana já constam no cassete. As informações do Cassete 48M estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características do cassete 48M.

Parâmetro	Valor
Comprimento (m)	2,116
Altura (m)	2,561
Largura (m)	1,745
Volume (m ³)	9,456

Fonte: SUEZ (2017).

Segundo Cote, Alam e Penny (2012), o lançamento do módulo ZW500D em 2003 é resultado de melhorias contínuas sobre a tecnologia durante um período superior a 15 anos, as quais levaram a um aumento da capacidade de filtração de 68 para 1055 m³.d⁻¹ por cassete, redução em 10 vezes na necessidade de aeração e mais de 6 vezes no custo das membranas, devido ao aumento do fluxo aplicado e diminuição do custo do metro quadrado de membrana. Os autores ainda apontam para a maior densidade de módulos por área ocupada, e por consequência, maiores taxas de filtração no tanque de membranas, as quais evoluíram de 1,9 para 8,0 m³.m².h⁻¹, sendo consideravelmente superiores às dos decantadores secundários, que giram em torno de 1 m³.m².h⁻¹.

BIORREATOR A MEMBRANA AVALIADO

Os principais parâmetros de projeto utilizados para dimensionar o BRM avaliado são apresentados na Tabela 3. O consumo per capita de água foi adotado segundo o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o qual indica que o consumo de água para o estado de Santa Catarina (BRASIL, 2018a). As características do esgoto afluente foram adotadas segundo Von Sperling (2007a), o qual apresenta valores típicos para o esgoto bruto em países em desenvolvimento.

Tabela 3: Parâmetros de projeto do BRM proposto.

Dados de entrada	Valor
População contribuinte (P)	50.000 hab
Consumo per capita de água (QPC)	150 L/hab.d
Coeficiente de retorno esgoto/água (CR)	0,8
Vazão média	6.060 m ³ .d ⁻¹
Vazão de infiltração (Qinf)	1% Q _{med}
Concentração média de DBO ₅ afluente ao tanque biológico	300 mg.L ⁻¹
Concentração média de DQO afluente ao tanque biológico	600 mg.L ⁻¹
Concentração média de NTK afluente ao tanque biológico	45 mg.L ⁻¹
Carga de DBO afluente	1.818 kg.d ⁻¹
Idade de lodo (θ _c)	40 d
Concentração de SSV no tanque biológico (X _v)	10 g.L ⁻¹

Segundo Meng et al. (2009), estudos indicam que a idade de lodo (θ_c) de um BRM deve estar compreendida entre 20 e 50 dias, para conferir um melhor controle da colmatação da membrana, com a respectiva relação alimento microrganismo (A/M) referente ao θ_c escolhido. Neste viés, com objetivo de proporcionar maiores eficiências de tratamento e menores volumes de lodo de descarte, adotou-se θ_c de 40 dias para o BRM proposto, com relação alimento/microrganismo estimada em 0,12 kg DBO/kg SSV.d (VON SPERLING, MARCOS, 2007).

A adoção da concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque biológico igual a 10 g.L⁻¹ seguiu as recomendações de Metcalf e Eddy (2014). Segundo os autores, apesar de um BRM poder operar com altas concentrações de SSV no tanque biológico (15 – 25 g.L⁻¹), concentrações entre 8 – 12 g.L⁻¹ se apresentam mais favoráveis em termos de custo benefício.

Para adequar e otimizar a operação da ETE estudada, considerou-se o volume do tanque de equalização igual a 80% do volume médio diário de esgoto afluente ao sistema (VERRECHT et al., 2010).

Adotou-se a concentração máxima de 10 mg.L⁻¹ de nitrogênio total no efluente final da ETE (BASTIAN; MURRAY, 2012). Tendo isso em vista, a etapa de pré-desnitrificação foi dimensionada para atingir eficiência de 80%, considerando um tempo de detenção hidráulica de 1,5 horas e taxa de recirculação interna igual a 400%, conforme indicado por Von Sperling (2007b). Cabe ressaltar que separação física oferecida pelas membranas oferece pouca vantagem em termos de remoção de fósforo (JUDD, S.; JUDD, 2011). Contudo, os autores indicam a possibilidade de introduzir uma etapa anaeróbia no sistema, favorecendo a remoção biológica de fósforo, ou prever a aplicação de processos de coagulação, permitindo alcançar concentrações inferiores a 0,1 mg.L⁻¹, caso sejam impostos limites restritivos relativos a concentração desse nutriente na água de reúso.

Por fim, é enfatizado que os critérios de projetos adotados podem variar conforme a necessidade de adequação às legislações, local do empreendimento, características do esgoto bruto, entre outros fatores, existindo diversos estudos acerca das diferentes conformidades envolvendo o tratamento de esgotos com BRM e a sua respectiva eficiência em termos de remoção de carga orgânica e nutrientes (BATTISTELLI, 2018; COSTA, 2018; BELLI, 2016). Ademais, a possibilidade de realizar o reúso de águas foi considerada em vista das indicações quanto ao potencial dos BRM em produzir efluentes de alta qualidade, permitindo tal prática (KOOTENAEI; AMINIRAD, 2014; LE-CLECH, 2010).

As principais unidades de tratamento e as suas respectivas dimensões são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Unidades de tratamento e as suas dimensões.

Unidade de tratamento	Volume útil (m³)	Altura (m)	Área superficial (m²)
Tanque biológico	1.530	4,5	340
Tanque de equalização	4848	4,5	1077
Tanque anóxico	387	4,5	86
Tanque de membranas	189	3,0	63

Segundo Metcalf e Eddy (2014), o fluxo escolhido pode variar entre 20 – 30 L/m²h⁻¹ para temperaturas entre 15 – 20°C, considerando concentrações intermediárias de sólidos suspensos voláteis no reator. Nesse contexto, o fluxo crítico adotado foi igual a 25 L/m²h⁻¹. Além disso, considerou-se um tempo de operação e relaxamento on/off equivalente a 9 minutos de operação e 1 minuto de relaxamento, indo ao encontro de parâmetros operacionais utilizados por diferentes fornecedores de membranas e BRM em escala real apresentados por Iglesias et al. (2017) e Metcalf e Eddy (2014), resultando em um fluxo de operação de aproximadamente 21 L.m²h⁻¹.

Tendo em vista os parâmetros adotados e as características do módulo de membranas escolhido, estimou-se um número de módulos necessários igual a 352. Contudo, considerando um fator de segurança de aproximadamente 7%, adotou-se 375 módulos, equivalendo a 7 cassetes 48M completos somados a 1 cassete contendo 39 módulos. Além disso, foi prevista a introdução de um cassete vazio no sistema, totalizando 15% de espaço livre, reservado para suprir a necessidade de introdução de mais módulos no sistema caso seja necessário trabalhar com fluxos mais baixos.

Por fim, o cálculo das dimensões do tanque de filtração foi realizado de modo a proporcionar alto nível de compactidade para o sistema, considerando as dimensões dos cassetes e o espaçamento entre eles. As principais informações acerca das dimensões e operação do tanque de filtração estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Dimensões e operação do tanque de filtração.

Parâmetro	Valor
Número de módulos	375
Número de cassetes	8+1
Operação / Relaxamento (min/min)	9/1
Fluxo crítico (L.m ² h ⁻¹)	25
Fluxo de operação (L.m ² h ⁻¹)	21
Volume (m ³)	189
Área superficial (m ²)	63
Largura (m)	3
Comprimento (m)	21
Profundidade (m)	3

LEVANTAMENTO DO CAPEX DO BRM AVALIADO

• COMPRA DE MEMBRANAS

Tendo em vista o módulo de membranas escolhido, realizou-se o contato com o respectivo fornecedor para agregar dados de custo da tecnologia. Dessa forma, foi possível obter informações a respeito do valor de mercado do metro quadrado de área filtrante do módulo em questão (7 \$.ft² ou 75,35\$.m⁻², em julho de 2018), bem como a proporção de custo entre a compra dos módulos e dos cassetes das membranas (70 e 30%, respectivamente, em agosto de 2018), considerando um módulo 48M totalmente preenchido.

Os dados de custo por metro quadrado de área filtrante, proporções de valores entre módulos e cassetes, bem como as demais informações acerca da compra de membranas necessárias para o BRM proposto são apresentadas na Tabela 6. Uma vez que este é um produto importado, é necessário considerar os impostos incidentes para a NCM 84219999, com destino final da compra localizado no estado de Santa Catarina. Os impostos, suas respectivas alíquotas e os tributos relativos à aquisição das membranas do BRM proposto são apresentados na Tabela 7. Cabe ressaltar que as alíquotas relativas ao II, PIS e COFINS incidem apenas sobre o valor aduaneiro, enquanto o IPI incide sobre o valor aduaneiro somado ao tributo referente ao II (BRASIL, 2018b). Já o ICMS tem sua base de cálculo diferenciada, a qual considera a soma do valor aduaneiro, II, IPI, PIS, COFINS e a alíquota estadual do ICMS (SANTA CATARINA, 1996).

Tabela 6: Custos referentes à compra de membranas.

Parâmetro	Valor
Custo ZW 500D	75,35 \$.m ⁻² ¹
Proporção custo membranas/total	70% ²
Proporção custo cassetes/total	30% ²
Número de módulos BRM	375
Área filtrante total do BRM	12.900 m ²
Valor aduaneiro membranas	\$971.980,17
Valor aduaneiro cassetes	\$469.882,99
Taxa de câmbio	4,0687 ³
Valor aduaneiro convertido membranas	R\$3.954.695,72
Valor aduaneiro convertido cassetes	R\$1.911.812,90
Valor aduaneiro convertido total	R\$5.866.508,62

Fonte: ¹ Contato com fornecedor em julho de 2018. ² Contato com fornecedor em agosto de 2018.

³ Fechamento PTAX de venda USD para BRL referente a 27/08/2018 (BCB, 2018).

Tabela 7: Impostos incidentes na compra de membranas.

Imposto	Alíquota (%)	Tributo (R\$)
II	14	821.311,21
IPI	8	535.025,59
PIS	2	123.196,68
COFINS	10,65	624.783,17
ICMS SC	17	1.632.578,67
Total impostos		3.736.895,31

Além disso, foi adotado um valor equivalente a 10% do valor aduaneiro convertido total como custo de instalação das membranas, conforme indicado por Young et al. (2013), totalizando R\$586.650,86. O custo final de aquisição das membranas, considerando a compra dos módulos, cassetes, impostos e instalação foi de R\$10.190.054,79 ou 203,80 R\$.hab⁻¹.

• COMPRA DE ÁREA

Os dados coletados nas séries históricas e estatísticas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a respeito do custo médio do metro quadrado para Santa Catarina, referentes ao ano de 2018, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Custo médio de compra de área em SC.

Mês de 2018	Custo de área em SC (R\$.m⁻²)
Janeiro	1.200,63
Fevereiro	1.207,52
Março	1.212,15
Abril	1.211,98
Maio	1.210,22
Junho	1.228,70
Média	1.211,87

Fonte: IBGE (2018a).

Considerando o somatório das áreas superficiais das principais unidades de tratamento apresentadas na Tabela 4, juntamente com uma margem de 100% para a implantação das demais instalações da ETE, além de locais para tráfego de veículos, estacionamentos, entre outros, foi estimada a compra de uma área de aproximadamente 3.133 m², equivalente à 0,063 m² por habitante atendido. Contudo, necessidades superiores de área para a instalação de BRMs são indicadas na literatura, com valores entre 0,15 – 0,30 m².hab⁻¹ (IGLESIAS et al., 2017), enquanto para lodos ativados convencional e de aeração prolongada estes valores giram em torno de 0,2 – 0,3 e 0,25 – 0,35 m².hab⁻¹ (VON SPERLING, 2007b). Nesse contexto, adotou-se a compra de uma área equivalente a 0,15 m².hab⁻¹, resultando em um terreno de 7.500 m² necessário para a instalação do BRM proposto, resultando em um custo de R\$9.089.000, equivalente à 181,79 R\$.hab⁻¹.

• CONSTRUÇÃO CIVIL

O custo da construção civil, caracterizado pela soma dos dispêndios com materiais de construção e mão de obra, foi estimado sobre a área construída da estação, uma vez que os dados fornecidos pelo IBGE são apresentados no formato R\$.m⁻². Os dados históricos compilados a respeito dos custos médios de materiais de construção e mão de obra são apresentados na Tabela 9 e Tabela 10, respectivamente.

Tabela 9: Custo médio de materiais de construção em SC.

Mês de 2018	Custo de materiais de construção em SC (R\$.m ⁻²)
Janeiro	562,92
Fevereiro	569,81
Março	571,22
Abril	571,05
Maio	571,23
Junho	576,06
Média	570,38

Fonte: IBGE (2018b).

Tabela 10: Custo médio de mão de obra em SC.

Mês de 2018	Custo de mão de obra em SC (R\$.m ⁻²)
Janeiro	637,71
Fevereiro	637,71
Março	640,93
Abril	640,93
Maio	638,99
Junho	652,64
Média	641,49

Fonte: IBGE (2018c).

Considerando o somatório das áreas superficiais das principais unidades de tratamento apresentadas na Tabela 4, juntamente com uma margem de 30% para a construção das demais instalações da ETE, foi estimada uma área construída de 2.036 m². Nesse contexto, o custo relativo à compra de materiais de construção e mão de obra foram R\$1.161.430,16 ou 23,23 R\$.hab⁻¹ e R\$1.306.213,14 ou R\$26,12 hab⁻¹, respectivamente. Portanto, o custo total de construção civil foi de R\$2.467.643,30 ou 49,35 R\$.hab⁻¹.

RESUMO DO CAPEX DO BRM PROPOSTO

O resumo dos custos relativos ao CAPEX do BRM proposto, incluindo os custos absolutos e relativos, está apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Resumo do CAPEX do BRM proposto.

Parâmetros	Custo Absoluto	Custo Relativo	
	(R\$)	(R\$.hab ⁻¹)	(R\$.m ⁻³ d)
CAPEX			
Membranas e Cassetes	10.190.054,79	203,80	1.681,53
Área	9.089.000,00	181,78	1.499,83
Compra de Materiais	1.161.430,16	23,23	191,66
Mão de obra	1.306.213,14	26,12	215,55
Total CAPEX	21.746.698,09	434,93	3.588,56

O CAPEX estimado em 3.588,56 R\$.m⁻³d ou 434,93 R\$.hab⁻¹ vai ao encontro de levantamentos realizados por Iglesias et al. (2017) em estações com BRM na Espanha, os quais analisaram os custos dos BRMs em comparação com lodos ativados com aeração prolongada e outras tecnologias de produção de água de reúso. De acordo com os autores, o CAPEX de estações com capacidade entre 5.000 – 10.000 m³d⁻¹ operando com lodos ativados com aeração prolongada; lodos ativados com posterior coagulação, filtros de areia e desinfecção; lodos ativados seguido de filtração com membranas; e BRM é equivalente a 600, 715, 1.030 e 960

€/m³d, respectivamente. Além disso, os autores comentam sobre a influência da capacidade da ETE sobre os custos de implantação, apontando valores de CAPEX para vazões entre 1000 – 2000 m³d⁻¹ em torno de 420 – 650 €/hab⁻¹, enquanto para capacidades acima de 10.000 m³d⁻¹ este valor reduz para 94 €/hab⁻¹ devido a economias de escala.

A maior contribuição individual para o CAPEX do BRM proposto equivale à compra de membranas e cassetes (47%), similar ao encontrado por Verrechet et al. (2010) (46,9%), seguido pela aquisição de área, representando 42%. Os custos de construção civil apresentaram baixa participação (11%), equivalente à 6% para a contratação de mão de obra e 5% para a compra de materiais, enquanto demais pesquisas estimaram contribuições entre 33 – 35% (VERRECHT et al., 2010; YOUNG, THOR et al., 2013). Contudo, uma maior representatividade desse parâmetro pode ser alcançada com a incrementação do custo de construção civil considerando o transporte de materiais e solo, terraplanagens, fundações, projetos e contratação dos demais funcionários necessários para a construção da ETE.

A distribuição das contribuições de cada parâmetro de CAPEX avaliado está resenteda na Figura 2.

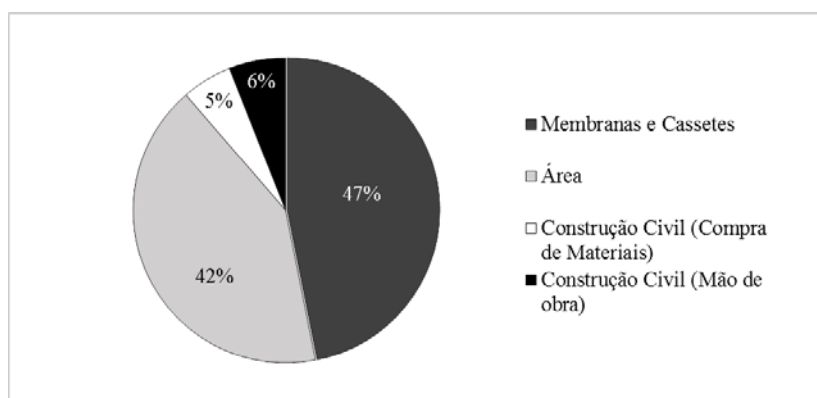


Figura 2: Contribuições individuais dos custos do CAPEX.

CONCLUSÕES

O levantamento dos custos de implantação para o BRM proposto apresentou valores equivalentes a 3.588,56 R\$.m³d ou 434,93 R\$.hab⁻¹ para o CAPEX, os quais vão ao encontro de outros estudos realizados abordando custos da mesma tecnologia. A maior contribuição individual para o CAPEX se deu pela compra de membranas e cassetes (50%), seguido pela aquisição de área (44,6%) e construção civil (5,4%).

RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista as conclusões objetivos nesta pesquisa, recomenda-se:

- Estudar as externalidades ambientais envolvidas no reúso de águas e a sua aplicação na análise de custo benefício;
- Realizar estudo de viabilidade econômica considerando os custos de implantação e operação juntamente com a receita da venda da água de reúso e as externalidades ambientais referentes à prática do reúso;
- Unir a avaliação de ciclo de vida com a análise de custos da tecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BASTIAN, R; D. MURRAY. Guidelines for Water Reuse. **US EPA Office of Research and Development**, Washington, DC, EPA/600/R-12/618, 2012.
2. BATTISTELLI, A. A. **Eletrobiorreator a Membrana Aplicado ao Tratamento De Efluentes Sanitários Objetivando a Remoção de Nutrientes e o Controle da Colmatação**. Tese (Doutorado em

- Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2018.
3. BELLI, T. J. **Remoção de nutrientes de esgoto sanitário em biorreator à membrana operado em batelada sequencial**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2015.
 4. BCB – Banco Central do Brasil. **Cotações e Boletins: Boletins intermediários de taxas de câmbio em uma data**. Disponível em: <<https://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?id=txcotacao>>. Acesso em: setembro de 2018.
 5. BHOYE, V. Y.; SANER, A. B.; AHER, P. D. Life Cycle Cost Analysis of Sewage Treatment Plants. **International Journal of Modern Trends in Engineering and Research**, p. 426–429, 2016.
 6. BRASIL. Ministérios das Cidades. Secretaria de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacionado de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016**, Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018a.
 7. BRASIL. Ministério da Fazenda, Receita Federal. **Simulador do Tratamento Tributário e Administrativo das Importações**. Disponível em: <<https://www4.receita.fazenda.gov.br/simulador/>>. Acesso em: 21/09/2018b.
 8. COSTA, R. E. **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 (UFSC). Florianópolis, 2018.
 9. COTE, P.; ALAM, Z.; PENNY, J. Hollow fiber membrane life in membrane bioreactors (MBR). **Desalination**, v. 288, p. 145–151, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.12.026>>.
 10. DALRI-CECATO, L. et al. Estimativa dos Custos de Operação de um Biorreator a Membrana. **REVISTA DAE**, 2019.
 11. DHILLON, B. S. **Life Cycle Costing for Engineers**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2010. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=mN3HCgOAXnUC>>.
 12. IGLESIAS, R. et al. Comparison of full scale water reclamation technologies with an emphasis on membrane bioreactors. **Water Science & Technology**, v. 75, n. 11, p. 2562–2570, 2017.
 13. IBGE. **Séries Históricas e Estatísticas – Unidades da Federação: Custo médio do m2**. Disponível em: <<https://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=2&op=1&vcodigo=PRECO415&t=custo-medio-m2>>. Acesso em: agosto de 2018a.
 14. IBGE. **Séries Históricas e Estatísticas – Unidades da Federação: Custo médio do m2 em moeda corrente – componente material**. Disponível em: <<https://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=2&op=1&vcodigo=PRECO405&t=custo-medio-m2-moeda-corrente-componente>>. Acesso em: agosto de 2018b.
 15. IBGE. **Séries Históricas e Estatísticas – Unidades da Federação: Custo médio do m2 em moeda corrente – componente mão-de-obra**. Disponível em: <<https://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=2&op=1&vcodigo=SI6&t=custo-medio-m2-moeda-corrente-componente>>. Acesso em: agosto de 2018c.
 16. JUDD, S. J. Membrane technology costs and me. **Water Research**, v. 122, p. 1–9, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.027>>.
 17. JUDD, S.; JUDD, C. **The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment**. Second ed. Oxford: Elsevier, 2011.
 18. KOOTENAEI, F. G.; AMINIRAD, H. Membrane Biological Reactors (MBR) and Their Applications for Water Reuse. **International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research**, v. 2, n. 7, p. 2208–2216, 2014.
 19. KOUL, A.; JOHN, S. A Life Cycle Cost Approach for Evaluation of Sewage Treatment Plants. **International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering**, v. 2, n. 7, p. 15–20, 2015.
 20. KUBBA, S. **Green Construction Project Management and Cost Oversight**. Oxford: Elsevier Science, 2010. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=XOni4-6TpUkC>>.
 21. LE-CLECH, P. Membrane bioreactors and their uses in wastewater treatments. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 88, n. 6, p. 1253–1260, 2010.
 22. MARECOS, H.; ALBUQUERQUE, A. **Reutilização de Águas Residuais**. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos e Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.
 23. MENG, F. et al. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane

- material. **Water Research**, v. 43, n. 6, p. 1489–1512, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.044>>.
24. METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=L1MAXTAkL-QC>>.
 25. METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 5ª ed. New York: McGraw-Hill, 2014. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=rOmVAQAACAAJ>>.
 26. PIRANI, S. et al. Life Cycle Assessment of Membrane Bioreactor Versus Cas Wastewater Treatment: Masdar City and Beyond. **The Sixth Jordan International Chemical Engineering Conference**, p. 1–10, 2012.
 27. REBITZER, G.; HUNKELER, D.; JOLLIEP, O. LCC - The Economic Pillar of Sustainability: Methodology and Application to Wastewater Treatment. **Environmental Progress**, n. 4, p. 241–249, 2003.
 28. SANTA CATARINA. Secretaria do Estado da Fazenda. **Lei 10.297, de 26 de dezembro de 1996**. Regulamenta a Legislação tributária no estado. Disponível em: <http://legislacao.sef.sc.gov.br/Consulta/Views/Publico/Frame.aspx?x=/Cabecalhos/frame_lei_10297.htm/>. Acesso em: setembro de 2018.
 29. SUEZ. **Water Technologies & Solutions – Fact sheet: ZeeWeed 500D cassette**, 2017. Disponível em: <https://www.suezwatertechnologies.com/kcpguest/documents/FactSheets_Cust/Americas/English/FSpw500D-CASS_EN.pdf>. Acesso em: setembro de 2018.
 30. SUEZ. **Water Technologies & Solutions – Fact sheet: ZeeWeed 500D module**, 2016. Disponível em: <<https://www.suezwatertechnologies.com/products/zeeweeds-500-membrane>>. Acesso em: setembro de 2018.
 31. VERRECHT, B. et al. The cost of a large-scale hollow fibre MBR. **Water Research**, v. 44, n. 18, p. 5274–5283, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.054>>.
 32. VON SPERLING, M. **Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors**. Londres: IWA Publishing, 2007. Disponível em: <<http://www.oapen.org/record/640169>>.
 33. VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=1pxhLVxVFHoC>>. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).
 34. VON SPERLING, M. **Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal**. Londres: IWA Publishing, 2007. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=wHSKO7Gz7ykC>>. (Biological Wastewater Treatment Series).
 35. YOUNG, T. et al. MBR vs. CAS : capital and operating cost evaluation. **Water Practice & Technology**, v. 7, n. 4, p. 1–8, 2012.
 36. YOUNG, T. et al. When does building an MBR make sense? How variations of local construction and operating cost parameters impact overall project economics. **Water Environment Federations Annual Technical Exhibition and Conference**, p. 6354–6365, 2013.