

ANÁLISE COMPARATIVA DAS ALTERNATIVAS PARA TRATAMENTO DE ESGOTOS DE RESIDÊNCIAS UNIFAMILIARES

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALTERNATIVES FOR TREATMENT OF SEWAGE FROM SINGLE-FAMILY RESIDENCES

Anne Relvas Pereira^a, Marco Antonio Almeida de Souza^a

^aUniversidade de Brasília, Brasil.

e-mail: annereivas@gmail.com, marcantoniosouza@gmail.com

Submissão: 17 de fevereiro de 2019 Aceitação: 18 de abril de 2020

Resumo:

O objetivo desta pesquisa foi analisar a aplicabilidade dos processos para tratamento de esgotos de residências unifamiliares no Brasil e as condições em que estes seriam recomendados. Foi desenvolvida uma metodologia baseada nos métodos multiobjetivo ELECTRE-III e TOPSIS. Avaliaram-se os seguintes processos: (1) Tanque séptico; (2) Tanque séptico e filtro anaeróbico; (3) Tanque séptico e *Wetland*; (4) UASB e biofiltro aerado submerso (BAS); (5) Reator UASB e lodo ativado convencional; e (6) Tanque séptico e Reator Biológico de Membrana (MBR). Esses processos foram avaliados em três cenários: (1) lençol freático baixo, solo com alta permeabilidade e risco epidemiológico e ambiental pequeno; (2) lençol freático alto e/ou solo com infiltração baixa e risco epidemiológico e ambiental grande; e (3) reúso direto não-potável da água. Concluiu-se que, para o Cenário 1, a melhor alternativa é Tanque Séptico seguido ou não por filtro anaeróbico. Para o Cenário 2, é mais adequado empregar Tanque Séptico seguido por filtro anaeróbico ou por *Wetland*. No Cenário 3, Tanque Séptico seguido por MBR e desinfecção é o ideal, mas a alternativa ótima deveria ser Tanque Séptico seguido por BAS e desinfecção, caso relaxassem-se alguns padrões de reúso de água.

Palavras chave: Tratamento descentralizado de esgotos; Análise de decisão multiobjetivo; Reator Biológico de Membrana (MBR).

Abstract:

The objective of this research was to analyse the applicability of processes for treating sewage from single-family dwellings in Brazil and the conditions under which they would be recommended. A methodology was developed based on the multi-objective ELECTRE-III and TOPSIS methods. The following processes were evaluated: (1) Septic tank; (2) Septic tank and anaerobic filter; (3) Septic tank and Wetland; (4) UASB and submerged aerated biofilter (BAS); (5) UASB reactor and conventional activated sludge; and (6) Septic tank and Biological Membrane Reactor (MBR). These processes were evaluated in three scenarios: (1) low water table, soil with high permeability, and small epidemiological and environmental risk; (2) high water table and / or soil with low infiltration, and great epidemiological and environmental risk; and (3) direct non-potable water reuse. The conclusion was that for Scenario 1 the best alternative is Septic Tank followed or not by an anaerobic filter. For Scenario 2, it is more appropriate to use a septic tank followed by an anaerobic filter or by Wetland. In Scenario 3, Septic Tank followed by MBR and disinfection is ideal, but the optimal alternative should be Septic Tank followed by BAS and disinfection, if some water reuse standards were relaxed.

Key words: Decentralized sewage treatment; Multiobjective decision analysis; Membrane Biological Reactor (MBR).

1. INTRODUÇÃO

Uma forma eficaz de tratamento de esgoto doméstico é o emprego de sistemas unifamiliares ou descentralizados, também chamados de sistemas individuais de esgoto, servindo a unidades habitacionais individuais ou a um grupo de residências.

Em sistemas descentralizados no Brasil, geralmente, utiliza-se o tanque séptico como forma de tratamento. Um dos motivos de preocupação com isso é que nos tanques sépticos não há remoção de nutrientes, patógenos e metais. Isso pode se tornar um fator de risco para a qualidade das águas subterrâneas e superficiais e, conseqüentemente, para a saúde pública. Por isso, tem aumentado o interesse em aperfeiçoar o desempenho desse tipo de alternativa.

Com o propósito de produzir um efluente de melhor qualidade, em comparação aos processos convencionais de tratamento de esgoto, as membranas acopladas ao tratamento biológico de esgoto, os chamados Reatores Biológicos de Membrana (MBR), podem oferecer vantagens aos sistemas de produção de água de reúso em localidades sem sistemas de esgotamento sanitário e que sofrem com a escassez hídrica.

Apesar de a tecnologia MBR ter sido objeto de várias pesquisas, ainda é pouco difundida no Brasil. Uma dificuldade para sua larga utilização aqui é o seu custo, considerado alto, e o fato de que não eram fabricadas membranas no país. Além disso, não foram encontradas aplicações e nem pesquisas, no Brasil, que abordem a possibilidade de sua utilização para o tratamento de esgotos em residências unifamiliares (GIACOBBO, 2010; PEREIRA, 2016; JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Na literatura internacional, podem ser encontradas várias aplicações de sistemas MBR a sistemas descentralizados de esgotos, ainda que muitas delas sejam em caráter de pesquisa ou de demonstração de sua viabilidade. Por exemplo, Abegglen, Ospelta e Siegrist (2008) investigaram o tratamento de um efluente doméstico com um sistema MBR localizado no porão de uma casa com quatro moradores. Sartor, Kaschek e Mavrov (2008) constataram que há viabilidade em aplicar o MBR em sistemas de esgotos descentralizados no Vietnã, naqueles locais onde não há rede de esgoto municipal. Battilani *et al.* (2010) utilizaram um sistema

denominado de *Biobooster* com disco rotativo e fluxo cruzado de aeração entre os discos de filtração de membrana do tipo cerâmica. Skouteris *et al.* (2012) trabalharam com um MBR piloto aeróbio submerso operado com esgoto doméstico com pré-tratamento para remoção de óleo/gordura e de areia/grãos, seguido de peneiramento fino e, posteriormente, um tanque de tratamento biológico e um tanque de filtração por membrana. Abbas e Dixon (2012) avaliaram a aplicabilidade da tecnologia MBR para sistemas de tratamento descentralizado de esgoto na cidade de Bagdá, no Iraque, sendo que o MBR se mostrou eficiente para estações de tratamento de pequena escala. Santasmasas *et al.* (2013), na Espanha, utilizaram a água cinza para reduzir o consumo de água potável em edifícios, após passar a água cinza pelo tratamento com um protótipo MBR. Tai *et al.* (2014) investigaram por cinco anos a operação de uma planta de MBR descentralizado em um condomínio próximo ao Rio São Lourenço nos EUA (*Whitehouse Terrace*) com capacidade de $33 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

Dessa forma, o objetivo geral desta pesquisa foi o de analisar, comparativamente, a aplicabilidade dos principais processos para tratamento de esgotos sanitários provenientes de unidades residenciais unifamiliares, no Brasil, e as condições em que esses processos seriam recomendados. Entretanto, nessa análise, incluiu-se, na comparação com as alternativas tradicionais de tratamento descentralizado de esgotos, a verificação da possibilidade de aplicação da tecnologia de Reatores Biológicos de Membrana (MBR). Para tanto, recorreu-se à análise de decisão com múltiplos objetivos e múltiplos critérios, tendo-se escolhido para isso os métodos ELECTRE-III e TOPSIS.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desta pesquisa foi concebida para realizar a análise dos processos clássicos de tratamento descentralizado de esgotos, comparando-os com o processo MBR, mediante a aplicação de métodos multicritério e multiobjetivo de análise de decisão. É importante estabelecer que, em um problema desse tipo, busca-se a alternativa que melhor se ajusta ao ambiente e às condições de um determinado local ou cenário. Nesse caminho, precisou-se responder a algumas questões, tais como: Quais são os principais objetivos e critérios que devem ser considerados

para verificar a aplicabilidade de cada processo de tratamento a sistemas descentralizados de esgotos no Brasil? Em que condições ou cenários cada processo de tratamento seria recomendável para ser utilizado em sistemas descentralizados de esgotos no Brasil?

Inicialmente, foram levantados e estudados os resultados de pesquisas realizadas no contexto geral e relacionadas ao tratamento de esgoto doméstico pelo processo MBR. Procurou-se obter uma visão ampla do processo MBR quando aplicado a sistemas descentralizados, em escala global e regional, e, posteriormente, correlacionaram-se os dados à realidade do Brasil. Após isso, realizou-se a concepção de um sistema de reator biológico aeróbio com membrana a partir de experiências anteriores com relativo sucesso, obtidas pelo levantamento bibliográfico, tendo-se efetuado a seleção de tipologia do processo e seus detalhes de dimensionamento.

Em segundo lugar, fez-se a avaliação do sistema MBR como concebido, ou seja, as informações obtidas serviram como subsídio para adquirir fundamentos e experiências sobre a tecnologia MBR, empregando um conjunto de fatores para a escolha de indicadores de desempenho.

Foi sugerido um procedimento de avaliação baseado em uma abordagem de análise de decisão com múltiplos objetivos e múltiplos critérios. Para facilitar o procedimento de avaliação, propôs-se converter o processo decisório em uma problemática de hierarquização de alternativas de tratamento de esgotos descentralizado, fazendo-se uma comparação dos processos de tratamento descentralizado de esgotos comumente usados no Brasil.

Os objetivos da avaliação foram levantados a partir de consulta à literatura. Os objetivos delineados para o caso estudado foram traduzidos em metas claras e quantificáveis, por meio da especificação de escalas métricas bem definidas, pelas quais foi possível avaliar as alternativas escolhidas. Considerou-se como objetivo geral da metodologia de análise implantar um sistema descentralizado de tratamento de esgoto doméstico para residências unifamiliares, criando uma alternativa-solução compatível com alguns cenários brasileiros. A partir desse objetivo geral e mediante consulta a trabalhos similares, definiram-se os seguintes objetivos específicos da análise: (1) avaliar e comparar alternativas de

tratamento de esgoto utilizadas no Brasil quanto à sua adequação às diferentes realidades locais existentes no País; e (2) escolher um sistema de tratamento de esgoto seguro e confiável que se ajuste aos aspectos financeiros, ambientais, técnicos e institucionais, propiciando benefícios para os usuários locais.

A partir da variedade encontrada na literatura de critérios e dimensões, escolheram-se os que eram usados com maior frequência e os que eram mais relevantes para avaliação de sistemas de tratamento descentralizado de esgotos. Mediante isso, utilizaram-se quatro dimensões e dez critérios de avaliação. Para avaliar e quantificar esses critérios, foram empregados dois procedimentos ou modelos para avaliação: o da planilha pontuada e o da planilha padronizada.

A proposta de construção de planilhas pontuadas buscou, por meio de perguntas, levantar numericamente a resposta para a avaliação quantitativa de cada alternativa segundo cada critério. O sistema de pontos das planilhas pontuadas seguiu uma escala de pontuação de zero a cem. Para a construção de planilhas padronizadas, obtiveram-se valores reais da literatura que representassem a realidade das alternativas levantadas nesta pesquisa, de modo que, por meio de ponderação quantitativa, se fizesse a padronização desses valores.

A padronização linear no intervalo de 0 a 100 foi feita pela Equação (1). Para auxiliar o preenchimento desses dois tipos de planilhas, foram construídas tabelas de apoio com dados numéricos obtidos na literatura e por analogia.

$$f(x) = \left(\frac{x - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Na Equação (1), $f(x)$ é a pontuação efetiva da alternativa segundo o critério x ; X é o valor do critério x para a alternativa; Min e Max são, respectivamente, os valores mínimo e máximo do critério x entre todas as alternativas consideradas.

A determinação dos pesos dos critérios (de 0 a 1), neste trabalho, foi executada levando-se em conta, ainda, o estudo de trabalhos prévios sobre metodologias de seleção de processos de tratamento de águas residuárias.

A geração das alternativas ocorreu a partir dos sistemas mais empregados no país, por considerar que estes possuem tecnologia já consolidada no Brasil, mais fácil acesso e com mais informações publicadas. Foram escolhidas

cinco dessas alternativas clássicas, com o propósito de criar um conjunto de alternativas tecnologicamente apropriadas para o caso de sistemas de tratamento de esgoto doméstico unifamiliar. Além dessas tecnologias clássicas, adicionou-se o sistema MBR, por ser o objetivo principal desta pesquisa. Desse modo, as alternativas de tratamento de esgotos que foram avaliadas tecnologicamente para o caso estudado são: A1 – Tanque séptico (TS); A2 – Tanque séptico seguido de filtro anaeróbio (TS+FA); A3 – Tanque séptico seguido de *Wetland* (TS+Wet); A4 – UASB seguido por biofiltro aerado submerso (UASB+BAS); A5 – UASB acompanhado por lodo ativado convencional (UASB+LAC); e A6 – Tanque séptico acompanhado por reator biológico com membrana (TS+MBR). O processo indicado aqui como *Wetland* refere-se ao processo de *Wetlands* Construídos (também denominado por alguns autores como Leitões Cultivados, sistemas de zonas de raízes, ou sistemas alagados construídos).

Os três cenários no Brasil estabelecidos para escolha da melhor alternativa estão descritos a seguir: Cenário 1 – Nível do lençol freático baixo e solo com alta permeabilidade, e risco epidemiológico e ambiental pequeno (o efluente poderá ser infiltrado no solo); Cenário 2 – Nível do lençol freático alto e/ou solo com capacidade de infiltração baixa, e risco epidemiológico e ambiental grande (efluente deverá ser lançado ao corpo receptor) ou quando é necessário fazer a descarga direta em corpo de água superficial (caso de embarcações, palafitas etc.); e Cenário 3 – Realização de reúso direto não-potável da água em área urbana que sofre com a escassez hídrica (lavagem de roupas e de veículos, descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos e fins ornamentais, chafarizes, espelhos de água etc.) ou reúso direto não-potável da água em irrigação para locais rurais.

Optou-se por trabalhar com dois métodos de análise multicritério que têm bases teóricas bastante diferentes: o método ELECTRE-III e o método TOPSIS, por se adequarem perfeitamente ao tipo de problema decisório, por aceitarem o formato das informações disponíveis e por serem considerados de fácil aplicação e entendimento. Além disso, optou-se também pela utilização desses métodos, no caso do TOPSIS, devido à facilidade em programar e executar o método em planilha Excel, e, no caso do ELECTRE-III, por conta da acessibilidade ao seu

programa computacional para utilização. Para o método TOPSIS, foi desenvolvido um programa para planilhas em Excel, e, para o método ELECTRE-III, utilizou-se o *software* para análise de decisão multicritério disponibilizado pela Universidade de Laval (<http://cersvr1.fsa.ulaval.ca/mcda/?q=en/node/11>).

O método TOPSIS (*Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*) baseia-se no princípio de que a alternativa escolhida deveria ter a menor distância vetorial a partir de uma solução positiva ideal (PIS – *Positive Ideal Solution*) e a maior distância a partir de uma solução negativa ideal (NIS – *Negative Ideal Solution*). O Método TOPSIS utiliza um coeficiente de similaridade para ordenar as alternativas. Detalhes do método TOPSIS e de sua programação podem ser encontrados em Figueroa *et al.* (2004), Shih, Shyr e Lee (2007) e Olson (2004).

O método ELECTRE-III (*Elimination and (Et) Choice Translating Reality – Version III*) elabora as comparações internamente, a partir de informações fornecidas pelo usuário, que proporcionam o estabelecimento de conceitos de limiares de “indiferença”, “preferência fraca”, “preferência estrita” e “veto”. Sua lógica de funcionamento é análoga aos outros métodos da série ELECTRE, em que são estabelecidas diferentes ordenações preferenciais das alternativas: uma ascendente, uma descendente e uma ordenação final formada a partir das anteriores (ROY, 1991; SLOWINSKI *et al.*, 2013).

A matriz de consequências (ou *pay-off matrix*) é a matriz de alternativas versus critérios, uma maneira lógica usada para mensurar ou estimar o desempenho de cada alternativa segundo cada critério. Foram construídas três dessas matrizes, uma para cada cenário concebido. Para isso, registraram-se as eficiências de todas as alternativas propostas de cumprimento de cada critério de avaliação, a partir das escalas de valores estabelecidas.

3. RESULTADOS

3.1. Coleta de informações e concepção do sistema MBR para residências unifamiliares

Após um levantamento da bibliografia sobre a aplicação de membranas no tratamento descentralizado de esgotos, chegou-se à concepção de um sistema MBR a ser adotado

para comparação com outros sistemas de tratamento de esgotos. Constatou-se que, das oito publicações consideradas mais relevantes em relação à operação do sistema MBR em sistemas descentralizados de esgotos, apenas dois sistemas utilizaram módulos de membranas do tipo fibra oca, cinco utilizaram módulos do tipo placa plana, e apenas um utilizou módulo compacto com membrana cerâmica de disco rotativo com fluxo cruzado. Além disso, apenas um trabalho utilizou membranas de microfiltração (MF), os outros todos utilizaram ultrafiltração (UF).

Em virtude desse levantamento, constatou-se que o tipo de membrana ideal a ser utilizado para aplicação em um MBR descentralizado são as membranas do tipo placa plana de ultrafiltração, em função da sua performance indicada pelas publicações internacionais. Como forma de evitar problemas de incrustação na membrana, rompimento e falha no sistema, observou-se que é necessário um pré-tratamento, tendo-se adotado, para isso, a instalação de um tanque séptico antes do MBR. Constatou-se também que o tanque com membrana que melhor se aplica ao sistema proposto é do tipo submerso, separado do reator biológico para facilitar a limpeza e a manutenção do sistema, o que foi adotado.

Baseado no levantamento bibliográfico, principalmente no estudo feito por Sadr *et al.* (2015), que compararam diversos arranjos e combinações utilizando membranas, foi constatado que a melhor aplicação para um cenário de reúso de água não-potável em uma comunidade em desenvolvimento que sofre com a escassez hídrica é um sistema composto por um tratamento primário seguido de um MBR (anóxico + aeróbio + unidade de filtração em membrana) + desinfecção.

O sistema sugerido foi baseado em Abegglen, Ospelta e Siegrist (2008), pois foi o que melhor atendeu às características requeridas por esta pesquisa, sendo o único encontrado que aplicou o MBR em uma residência unifamiliar, e que, por operar de modo intermitente, deve reduzir ao máximo o consumo de energia. O sistema proposto contempla um tanque séptico, seguido por um tanque anóxico, tanque biológico aerado e tanque submerso com membrana. O módulo de membrana foi posicionado em um tanque separado, por apresentar vantagens adicionais de manutenção, além de atuar como

um tanque de aeração de segundo estágio.

O dimensionamento do sistema MBR seguiu os critérios e diretrizes estabelecidos por Judd e Judd (2011) para um MBR submerso com modelo em estado estacionário. Por esse método, o dimensionamento é baseado em uma combinação de dados empíricos e biocinéticos, com base na bioquímica do processo biológico aeróbio. A aplicação da proposta do sistema destinou-se a uma estação de tratamento de esgotos domésticos de uma residência com cinco moradores. As características do efluente, após tratamento primário, consideradas para o dimensionamento foram os de DQO – Demanda Química de Oxigênio, DBO_5 – Demanda Bioquímica de Oxigênio ao quinto dia, NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl, SST – Sólidos Suspensos Totais e SSV – Sólidos Suspensos Voláteis, com os valores de 481, 229, 40, 151 e 107 mgL^{-1} , respectivamente. Devido à impossibilidade de serem obtidos os valores reais dos parâmetros de dimensionamento (pois ter-se-ia que testar em planta piloto), os valores biocinéticos típicos do sistema de lodos ativados foram usados para o MBR, pois o seu uso não apresenta erro significativo (JUDD; JUDD, 2011). Com isso, o sistema MBR proposto ficou com os seguintes volumes: (a) Tanque séptico: 2 m^3 ; (b) Tanque anóxico: 0,25 m^3 ; (c) Tanque biológico aerado: 0,30 m^3 ; e (d) Tanque com membrana submersa: dependente da característica do módulo de membrana selecionado, sendo especificado pelo fabricante.

3.2. Definição dos critérios e pesos

Com o levantamento preliminar dos critérios na bibliografia, foram escolhidos os que obtiveram maior frequência de uso, totalizando nove critérios, tendo-se adicionado mais um, nível de complexidade, avaliado por Sadr *et al.* (2013) como o mais importante para ser considerado em países em desenvolvimento.

Com o propósito de facilitar a compreensão e obter uma boa simulação, os dez critérios foram agrupados em dimensões de avaliação técnica, econômica, ambiental e social, com os mecanismos de avaliação que estão apresentados na Tabela 1. Para a indicação do comportamento de cada critério, identificaram-se a preferência crescente, para aqueles que se aproximam de ótimo quando seus valores aumentam, e a decrescente, quando seus valores

diminuem.

Optou-se por uma forma de análise de sensibilidade da decisão. Para isso, foram adotadas estratégias para atribuição dos pesos para cada critério, conforme apresentadas nas Tabelas 2 e 3. Com o intuito de testar a consistência das respostas a serem obtidas com a aplicação da metodologia sob diferentes situações, primeiramente, foram considerados pesos iguais para todos os critérios (1/10) e, em seguida, estabeleceram-se os pesos de acordo com as dimensões, considerando que os pesos dos critérios da dimensão priorizada seriam o dobro das dimensões não priorizadas. Por último, priorizaram-se os objetivos de acordo com a necessidade dos cenários, e os pesos atribuídos foram definidos da maneira apresentada a seguir.

Para o Cenário 1, de acordo com a realidade local, considerou-se que o efluente poderia ser infiltrado no terreno, e, por isso, os critérios escolhidos que apresentam maior relevância nesta situação estão relacionados ao funcionamento técnico do sistema de tratamento, especificamente, confiabilidade e complexidade. Adotou-se peso dobrado a esses critérios em relação aos demais critérios.

Para o Cenário 2, os aspectos mais importantes a serem considerados estão relacionados com a qualidade do efluente tratado, risco de falha da tecnologia e o impacto que possa ocasionar ao local. Por isso, aos critérios confiabilidade, impacto ambiental e conformidade com a legislação foram atribuídos valores duas vezes maiores que os demais critérios.

Com a intenção de representar diversas realidades brasileiras que sofrem com a escassez

hídrica e de realizar reúso da água, propôs-se o cenário 3. Neste cenário, os parâmetros que têm maior influência estão relacionados à capacidade de produzir um efluente de ótima qualidade. Conseqüentemente, este cenário exige uma alternativa mais complexa e deve-se considerar o comportamento da família/comunidade quanto à aceitabilidade do processo. Portanto, enfatizaram-se os critérios confiabilidade, impacto ambiental, conformidade e aceitação da comunidade, com o dobro do peso dos demais critérios, e, para o critério conformidade com a legislação, com o peso três vezes maior que os demais.

3.3. Avaliação da performance das alternativas segundo o critério de Área exigida (C2)

Utilizou-se para medir este critério a variável “área demandada por metro cúbico de esgoto tratado”, que é um parâmetro médio fornecido pela literatura para cada processo ou operação unitária. Os valores foram adotados por meio de padronização de valores disponíveis na literatura, sendo que a pontuação mais alta foi atribuída à tecnologia que exige uma menor área, e uma pontuação mais baixa foi atribuída à tecnologia que exige maior área (o resultado é mostrado na Tabela 5). No caso da alternativa 4, como não foram encontrados valores indicados na literatura, utilizou-se uma analogia lógica, em que a alternativa 4 deve ocupar área maior que a alternativa 2 e menor que a alternativa 5, e tomou-se a média aritmética dos dois valores de área ocupada dessas alternativas.

Tabela 1 – Dimensões e critérios de avaliação escolhidos para a análise de processo MBR para tratamento descentralizado de esgotos

Dimensão	Critério	Mecanismo de avaliação	Preferência
Técnica	C1. Consumo de energia	Planilha padronizada	Decrescente
	C2. Área exigida	Planilha padronizada	Decrescente
	C3. Quantidade de resíduo (lodo) produzido	Planilha padronizada	Decrescente
	C4. Confiabilidade	Planilha pontuada	Crescente
	C5. Complexidade operacional	Planilha pontuada	Decrescente
Econômica	C6. Custo de capital ou de implantação)	Planilha padronizada	Decrescente
	C7. Custo de O&M	Planilha pontuada	Decrescente
Ambiental	C8. Impacto Ambiental	Planilha pontuada	Decrescente
	C9. Conformidade com a Política e Legislação Ambiental	Planilha pontuada	Crescente
Social	C10. Aceitação da comunidade / chefe da família	Planilha pontuada	Crescente

Fonte: os autores.

Tabela 2 – Estratégias para aplicação de pesos para análise de sensibilidade do modelo

Dimensão	Critérios	Estratégias					
		Peso igual para os critérios	Peso igual para as dimensões	Técnica	Econômica	Ambiental	Social
Técnica	C1	0,1	0,05	0,133	0,0831	0,0831	0,091
	C2	0,1	0,05	0,133	0,0831	0,0831	0,091
	C3	0,1	0,05	0,133	0,0831	0,0831	0,091
	C4	0,1	0,05	0,133	0,0831	0,0831	0,091
	C5	0,1	0,05	0,133	0,0831	0,0831	0,091
Econômica	C6	0,1	0,125	0,067	0,167	0,0831	0,091
	C7	0,1	0,125	0,067	0,167	0,0831	0,091
Ambiental	C8	0,1	0,125	0,067	0,0831	0,167	0,091
	C9	0,1	0,125	0,067	0,0831	0,167	0,091
Social	C10	0,1	0,25	0,067	0,0831	0,0831	0,181

Fonte: os autores.

Tabela 3 – Aplicação de pesos de acordo com os cenários

Dimensões	Critérios	Estratégias		
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Técnica	C1. Consumo de energia	0,083	0,077	0,067
	C2. Área exigida	0,083	0,077	0,067
	C3. Quantidade de resíduo (lodo) produzido	0,083	0,077	0,067
	C4. Confiabilidade	0,166	0,154	0,133
	C5. Nível de complexidade	0,166	0,077	0,067
Econômica	C6. Custo de capital ou de implantação	0,083	0,077	0,067
	C7. Custo de O&M	0,083	0,077	0,067
Ambiental	C8. Impacto Ambiental	0,083	0,154	0,133
	C9. Conformidade com a Política e Legislação Ambiental	0,083	0,154	0,201
Social	C10. Aceitação da comunidade / chefe da família	0,083	0,077	0,133

Fonte: os autores.

Tabela 4 – Valores adotados para quantificar o critério consumo de energia

Alternativas	Valor adotado
A1. TS	0
A2. TS + Fan	0
A3. TS + Wet	0
A4. UASB + BAS	50
A5. UASB + LAC	75
A6. TS + MBR	100

Fonte: os autores.

Tabela 5 – Valores adotados para quantificar o critério área exigida

Alternativas	Área total (m ² m ⁻³)	Referências	Valor padronizado
A1. TS	0,7	Leroy Merlin (2016)*	0
A2. TS + FAn	0,85	ALFAMEC (2016)*	3
A3. TS + Wet	5,83	Guo <i>et al.</i> (2014)	100
A4. UASB + BAS	1,43	Analogia**	14
A5. UASB + LAC	2,01	Tega (2016)*	26
A6. TS + MBR	0,83	Guo <i>et al.</i> (2014)	3

*Área calculada de acordo com a característica dos sistemas ofertados no mercado. **Considerou-se esse sistema maior que a alternativa 2 e menor que a alternativa 5 e tomou-se a média aritmética dos dois valores.

Fonte: os autores.

3.4 Avaliação da performance das alternativas segundo o critério de quantidade de resíduo (lodo) produzido (C3)

Este critério considera a quantidade de produção de resíduo normalmente apresentada para cada alternativa de tratamento avaliada sob condições normais de operação. Como no caso o único resíduo que se apresentava era o lodo, foi

este o resíduo computado. Os valores de produção de lodo foram adotados por meio de padronização de valores disponíveis na literatura. Para as tecnologias com menor quantidade de lodo gerado, foi atribuída pontuação mais alta, enquanto que, para as de maior produção de lodo, atribuiu-se pontuação menor (o resultado dessa avaliação é mostrado na Tabela 6).

Tabela 6 – Valores adotados para quantificar o critério quantidade de resíduo (lodo) produzido

Alternativas	Produção de lodo (ghab ⁻¹ d ⁻¹)	Referências	Valor padronizado
A1. TS	30	Von Sperling* (2005)	40
A2. TS + FAn	39		100
A3. TS + Wet	30		40
A4. UASB + BAS	30	Alem Sobrinho e Jordão* (2001)	40
A5. UASB + LAC	27		20
A6. TS + MBR	24	Abegglen, Ospelta e Siegrist (2008)	0

*Considerou-se o valor máximo de produção de lodo.

Fonte: os autores.

3.5 Avaliação da performance das alternativas segundo o critério de confiabilidade (C4)

O critério “confiabilidade” foi avaliado considerando-se a frequência com que cada alternativa de tratamento de esgoto apresenta falhas, sua capacidade de lidar com variação de vazão e carga, e o risco inerente de interromper o tratamento. Foram estimados os valores de “confiabilidade” para cada processo ou operação

unitária fornecida. Para as alternativas que produziram maior confiabilidade, foram atribuídas pontuações mais altas e vice-versa. O cálculo deste critério foi obtido pela planilha pontuada apresentada na Tabela 7. Na Tabela 8, apresentam-se as respostas obtidas na planilha pontuada referente ao critério confiabilidade.

3.6 Avaliação da performance das alternativas segundo o critério de complexidade operacional (C5)

Como este critério indica o nível de habilidade necessária para operação e manutenção da tecnologia de tratamento, para as tecnologias menos complexas, foram atribuídas pontuações mais elevadas e vice-versa. A mensuração do valor deste critério em cada alternativa foi obtida por planilha pontuada representada na Tabela 9. Na Tabela 10, apresentam-se as respostas dadas na planilha pontuada referente ao critério complexidade operacional.

3.7 Avaliação da performance das alternativas segundo o critério de custo de capital ou de implantação (C6)

Para as tecnologias associadas a elevados custos de capital, foram atribuídas pontuações altas, enquanto que para aquelas associadas com menores custos de capital, atribuíram-se pontuações mais baixas. Os valores foram adotados por meio de padronização de valores fornecidos por empresas que fabricam e comercializam no Brasil esses sistemas de tratamento, encontrados na literatura e por

analogia, como apresentados na Tabela 11. No caso da alternativa 4, em que não foi possível estimar o preço, usou-se uma abordagem de raciocínio de comparação da alternativa em relação às outras alternativas, considerando uma variação linear dos preços. Assim, pelo raciocínio da comparação das estruturas e da complexidade das instalações de cada alternativa, tomou-se a média dos preços das alternativas 3 e 5 como o preço da alternativa 4.

3.8 Avaliação da performance das alternativas segundo o critério de custo de operação e manutenção (O&M) (C7)

Para as tecnologias associadas a altos custos de O&M, foram atribuídas pontuações altas, enquanto para aquelas associadas com menores custos de O&M, pontuações mais baixas. Os valores foram adotados por meio de planilha pontuada que está apresentada na Tabela 12. Os resultados da aplicação ao caso da planilha pontuada da Tabela 12 referente ao critério O&M estão expostos na Tabela 13.

Tabela 7 – Planilha pontuada para o critério confiabilidade

Item	Pontuação
1. Com que frequência o processo apresenta falhas?	0 - Alta
	12,5 - Média
	25 - Baixa
2. A alternativa apresenta risco de ser interrompida?	0 - Sim
	25 - Não
3. A alternativa tem capacidade de lidar com vazão e cargas variáveis?	0 - Não
	25 - Sim
4. Como as condições operacionais podem afetar a qualidade do efluente?	0 - Muito
	12,5 - Pouco
	25 - Nenhum

Fonte: os autores.

Tabela 8 – Valores adotados para quantificar o critério confiabilidade

Alternativas	Tendências a falhas	Risco de ser interrompida	Lida com variações de carga e vazão	Varição do efluente	Pontuação
A1. TS	Baixa	Não	Sim	Nenhum	100
A2. TS + Fan	Baixa	Não	Sim	Pouco	87,5
A3. TS + Wet	Baixa	Não	Sim	Pouco	87,5
A4. UASB + BAS	Média	Sim	Sim	Pouco	50
A5. UASB + LAC	Média	Sim	Sim	Pouco	50
A6. TS + MBR	Média	Sim	Sim	Muito	37,5

Fonte: os autores.

Tabela 9 – Planilha pontuada para o critério complexidade operacional

Item	Pontuação
1. A alternativa possui uma tecnologia complexa?	0 – Não
	16,7 - Sim
2. Para o funcionamento da alternativa é necessária a incorporação de outros equipamentos?	0 – Não
	16,7 - Sim
3. Qual o grau de automação necessário para a execução automática da alternativa?	0 - Nenhum
	8,35 - Médio
	16,7 - Alto
4. É necessária mão de obra especializada para a operação da alternativa?	0 – Não
	16,7 - Sim
5. É necessário realizar o monitoramento e o controle operacional remoto?	0 – Não
	16,7 - Sim
6. Com que frequência a alternativa depende da assistência técnica de terceiros?	0 - Raramente
	8,35 - Às vezes
	16,7 - Sempre

Fonte: os autores.

Tabela 10 – Valores adotados para quantificar o critério complexidade operacional

Alternativas	Tecnologia complexa	Necessita de equip.	Grau de automação	Mão de obra Espec.	Controle remoto	Frequência assistência	Pontuação
A1. TS	Não	Não	Nenhum	Não	Não	Raramente	0
A2. TS + FAn	Não	Não	Nenhum	Não	Não	Raramente	0
A3. TS + Wet	Não	Sim	Nenhum	Não	Não	Às vezes	25,05
A4. UASB + BAS	Não	Sim	Nenhum	Sim	Não	Às vezes	41,75
A5. UASB + LAC	Não	Sim	Nenhum	Sim	Não	Sempre	50
A6. TS + MBR	Sim	Sim	Alto	Sim	Sim	Sempre	100

Fonte: os autores.

Tabela 11 – Valores adotados para quantificar o critério custo de implantação

Alternativas	Valor (R\$hab ⁻¹)	Referência	Valor ponderado
A1. TS	596,18	Leroy Merlin (2016)*	0
A2. TS + FAn	1.534,00	Delta Saneamento ambiental (2016)*	13
A3. TS + Wet	2.526,90	Molinos-Senante <i>et al.</i> (2012)	26
A4. UASB + BAS	4.963,45	Analogia**	59
A5. UASB + LAC	7.400,00	Tega (2016)*	92
A6. TS + MBR	8.000,00	Pam Membranas (2015)*	100

*Dados informados por empresas que vendem sistemas de tratamento de esgoto (o valor de custo foi dividido pela capacidade de tratamento). **Considerou-se a alternativa 4 com preço mais baixo que a alternativa 5 e mais alto que a alternativa 3, valor adotado pela média do preço dessas duas alternativas.

Fonte: os autores.

3.9 Avaliação da performance das alternativas segundo o critério de custo de operação e manutenção (O&M) (C7)

Para as tecnologias associadas a altos custos de O&M, foram atribuídas pontuações altas, enquanto para aquelas associadas com menores custos de O&M, pontuações mais baixas. Os valores foram adotados por meio de planilha pontuada que está apresentada na Tabela 12. Os resultados da aplicação ao caso da planilha pontuada da Tabela 12 referente ao critério O&M estão expostos na Tabela 13.

3.10 valiação da performance das alternativas segundo o critério de impacto ambiental (C8)

A mensuração deste critério foi realizada por meio da combinação de possibilidades de uma alternativa de tratamento de esgotos provocar problemas ambientais devido à ocorrência associada dos seguintes fatores: produção de maus odores e de ruídos; maior consumo de energia e de produtos químicos; e poluição do solo e da água. Para a tecnologia de tratamento com menor impacto ambiental, foi atribuída uma pontuação baixa e vice-versa. O cálculo deste critério foi obtido pela planilha pontuada apresentada na Tabela 14 e as respostas encontram-se na Tabela 15.

Tabela 12 – Planilha pontuada para o critério custo de operação e manutenção

Item	Pontuação
1. Qual a magnitude do consumo de energia elétrica proveniente da operação da alternativa?	0 - Não consome energia
	8,35 – Média
	16,7 – Alta
2. Qual é a quantidade de equipamentos exigida?	0 – Baixa
	8,34 – Média
	16,7 – Alta
3. A alternativa exige o uso de produtos químicos?	0 – Não
	16,7 – Sim
4. A alternativa necessita de substituição de equipamentos ou materiais?	0 – Não
	16,7 – Sim
5. Qual a frequência de manutenção do sistema?	0 – Baixa
	8,34 – Média
	16,7 – Alta
6. Qual o nível de qualificação exigida para a operação da alternativa?	0 – Baixa
	8,34 – Média
	16,7 – Alta

Fonte: os autores.

Tabela 13 – Valores adotados para quantificar o critério custo de O&M

Alternativas	Consumo de energia	Exigência de equip.	Produto químico	Substit. de equip.	Freq. de manut.	Nível de qualificação na operação	Pontuação
A1. TS	Não	Baixa	Não	Não	Baixa	Baixa	0
A2. TS + FAn	Não	Baixa	Não	Não	Baixa	Baixa	0
A3. TS + Wet	Não	Baixa	Não	Sim	Média	Baixa	25,05
A4. UASB + BAS	Média	Média	Não	Sim	Média	Média	50
A5. UASB + LAC	Alta	Média	Não	Sim	Alta	Alta	75,15
A6. TS + MBR	Alta	Alta	Sim	Sim	Alta	Alta	100

Fonte: os autores.

Tabela 14 – Planilha pontuada para o critério impacto ambiental

Item	Pontuação
1. Qual a intensidade do odor gerado pela alternativa?	0 - Baixa
	8,35 - Média
	16,7 - Alta
2. Qual a intensidade das vibrações e de ruídos emitidos pela alternativa?	0 - Baixa
	8,35 - Média
	16,7 - Alta
3. Na operação da alternativa, é necessário o consumo de energia elétrica?	0 – Não
	16,7 - Sim
4. Na operação da alternativa, é necessário o uso de produtos químicos?	0 – Não
	16,7 - Sim
5. A alternativa causa risco de poluição do solo?	0 - Baixa
	8,35 - Média
	16,7 - Alta
6. A alternativa causa risco de poluição da água subterrânea ou superficiais?	0 - Baixa
	8,35 - Média
	16,7 - Alta

Fonte: os autores.

Tabela 15 – Valores adotados para quantificar o critério impacto ambiental

Alternativas	Odor	Ruído	Energia elétrica	Produto químico	Poluição do solo	Poluição da água	Pontuação
A1. TS	Alta	Baixa	Não	Não	Alta	Média	41,75
A2. TS + FAn	Alta	Baixa	Não	Não	Média	Baixa	25,05
A3. TS + Wet	Alta	Baixa	Não	Não	Baixa	Baixa	16,7
A4. UASB + BAS	Alta	Média	Sim	Não	Baixa	Baixa	41,75
A5. UASB + LAC	Alta	Alta	Sim	Não	Baixa	Baixa	50,1
A6. TS + MBR	Alta	Alta	Sim	Sim	Baixa	Baixa	66,8

Fonte: os autores.

3.11 Avaliação da performance das alternativas segundo o critério de conformidade com a Política e Legislação Ambiental (C9)

Quanto maior foi a associação de conformidades do efluente de uma tecnologia com as legislações ambientais, tanto maior foi a sua pontuação atribuída. Para comparação dos parâmetros das alternativas com a legislação vigente, avaliaram-se duas situações específicas de acordo com o cenário considerado. Para os cenários 1 e 2, consideraram-se os padrões de lançamento de efluente sanitário no corpo receptor destacados na Resolução 430/2011 do CONAMA (BRASIL, 2011), e, para o cenário 3, levaram-se em conta apenas as alternativas A4, A5 e A6 para serem avaliadas de acordo com os

parâmetros de Classe 3 dos padrões de reúso da ANA (2005), os quais foram os escolhidos por serem os menos restritivos comparados com as outras classes. A planilha pontuada para avaliar esse critério está apresentada na Tabela 16. Na Tabela 17, apresentam-se os dados de alguns parâmetros de qualidade de efluente dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário encontrados na literatura e a pontuação adotada para a avaliação desse critério.

3.12 Avaliação da performance das alternativas segundo o critério de aceitação da comunidade / família (C10)

Este critério envolve complexidades e incertezas decorrentes dos interesses, identidades culturais, ideologias e objetivos das

diferentes partes interessadas, além de experiências do passado. Uma pontuação mais elevada foi dada para a tecnologia com maior reconhecimento público, e uma pontuação mais baixa foi dada a uma tecnologia que não foi

compreendida ou acatada publicamente. A planilha pontuada elaborada para avaliação desse critério está apresentada na Tabela 18 e as respectivas respostas estão na Tabela 19.

Tabela 16 – Planilha pontuada para o critério conformidade com a política e legislação ambiental

Item	Pontuação
Atende aos padrões de lançamentos em corpo receptor (Classe II) (CONAMA Resolução 430/2011) – Aplicados aos cenários 1 e 2?	
1. DBO ₅ (120 mgL ⁻¹ ou 60%)	0 - Não atende 33,3 – Atende
2. Nitrogênio amoniacal (20 mgL ⁻¹)	0 - Não atende 33,3 – Atende
3. SST (remoção > 20%)	0 - Não atende 33,3 – Atende
Atende aos padrões de reúso da ANA (2005), Classe 3: irrigação de áreas verdes e rega dos jardins – Aplicados ao cenário 3?	
1. SST - Sólidos suspensos totais (≤ 20,0 mgL ⁻¹)	0 - Não atende 25 – Atende
2. Turbidez (≤ 5,0 NTU)	0 - Não atende 25 – Atende
3. DBO ₅ (≤ 20,0 mgL ⁻¹)	0 - Não atende 25 – Atende
4. Nitrogênio amoniacal (5-30 mgL ⁻¹)	0 - Não atende 25 – Atende

Fonte: os autores.

Tabela 17 – Valores adotados para quantificar o critério conformidade com a política e legislação ambiental

Parâmetros	Alternativas					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
DBO ₅ (mgL ⁻¹)	170	< 60	< 20	12	< 20	< 10
Nitrogênio amoniacal (mgL ⁻¹)	> 20	> 15	10	5-10	5-15	3,2
Turbidez (UNT)	60	78	-	<20*	16	< 5
SST - Sólidos suspensos totais (mg L ⁻¹)	< 100	< 20	<20	14	< 30	2,6
Pontuação Cenários 1 e 2	66,8	100	100	100	100	100
Pontuação Cenário 3	-	-	-	75	50	100

*Valor não encontrado e, por analogia, considerando o baixo teor de SST, adotou-se menor que 20. Referências: Andrade Neto, Van Haandel e Melo (2002); Chernicharo *et al.* (2001); USEPA (2002); Gonçalves, Araújo e Chernicharo (1998); von Sperling (2005); Ávila (2005); Sartor, Kaschek, e Mavrov (2008); Abegglen, Ospelta e Siegrist (2008); Bof *et al.* (2001); Skouteris *et al.* (2012); Abbas e Dixon (2012); Luna *et al.* (2013).

Fonte: os autores.

Tabela 18 – Planilha pontuada para o critério de aceitação da comunidade / chefe da família

Item	Pontuação
1. O sistema pode ser aceito pela comunidade ou pela família?	0 – Não
	33,3 - Sim
2. O sistema pode possibilitar o envolvimento da comunidade na sua manutenção e operação?	0 - Não
	12,5 - Parcialmente
	33,3 - Sim
3. O sistema pode ser adaptado de acordo com as necessidades da comunidade?	0 - Não
	12,5 - Parcialmente
	33,3 - Sim

Fonte: os autores.

Tabela 19 – Planilha pontuada para o critério aceitação da comunidade / família

Alternativas	Aceitabilidade do sistema	Envolve a comunidade na O&M	Pode ser adaptado ou expandido	Pontuação
A1. TS	Sim	Sim	Sim	100
A2. TS + FAn	Sim	Sim	Sim	100
A3. TS + Wet	Sim	Sim	Sim	100
A4. UASB + BAS	Sim	Parcialmente	Parcial	66,7
A5. UASB + LAC	Sim	Não	Parcial	50
A6. TS + MBR	Sim	Não	Não	33,3

Fonte: os autores.

3.13 Avaliação multiobjetiva das alternativas de tratamento de esgoto

Os resultados do preenchimento das planilhas ponderadas e das planilhas padronizadas e pontuadas foram compostos para

constituírem a matriz de avaliação (ou *Pay-off Matrix*) que está apresentada na Tabela 20. Dados os diferentes cenários, os valores adotados para o critério referente à conformidade com a política e legislação ambiental variaram conforme a aplicação.

Tabela 20 – Matriz de avaliação das alternativas de acordo com cada critério

Dimensão	Critério	Alternativas					
		A1	A2	A3	A4	A5	A6
Técnica	C1	0	0	0	50	75	100
	C2	0	3	100	14	26	3
	C3	40	100	40	40	20	0
	C4	100	87,5	87,5	50	50	37,5
	C5	0	0	25,05	41,75	50	100
Econômica	C6	0	13	26	59	92	100
	C7	0	0	25,05	50	75,15	100
Ambiental	C8	41,75	25,05	16,7	41,75	50,1	66,8
	C9 ¹	66,6	100	100	100	100	100
	C9 ²	-	-	-	75	50	100
Social	C10	100	100	100	66,7	50	33,3

¹Simulação para o Cenário 1 e 2; ²Simulação para o Cenário 3 (Reúso).

Fonte: os autores.

Os resultados contidos na Matriz de Avaliação (mostrada na Tabela 20) foram aplicados aos métodos TOPSIS e ELECTRE-III, para se obter a hierarquização das alternativas. Os resultados dessa aplicação são mostrados a seguir em forma tabelada, em que as alternativas estão posicionadas quanto à ordem de classificação no *ranking*, de modo que os resultados da posição das alternativas do método ELECTRE-III estão apresentados na segunda coluna, e do método TOPSIS nas demais colunas juntamente com os valores encontrados para os coeficientes de similaridade com $p=1$, $p=2$ e $p=\infty$. Os valores escolhidos para atribuir aos limiares são os que melhor se adaptam para expressar o

caráter imperfeito do conhecimento (FIGUEIRA; MOUSSEAU; ROY, 2005). Desconsiderou-se o veto nesta avaliação, então, o limite de veto não foi utilizado, uma vez que todos os critérios estão aplicados na mesma escala, e os desempenhos dos critérios não apresentam grande discrepância.

Neste trabalho, para a aplicação do método ELECTRE-III, escolheram-se os limiares de preferências (p) com 25% do valor médio dos critérios definidos como valores de referências e adotou-se uma relação de $p/q=2,5$. Na Tabela 21, apresentam-se os valores adotados para representar a indiferença e a preferência de cada critério.

Tabela 21 – Limiares de preferência e de indiferença adotados para a simulação do método ELECTRE-III

Critérios	q	p	Critérios	q	p
C1	3,8	9,4	C6	4,8	12,1
C2	4,7	11,7	C7	4,2	10,4
C3	4,0	10,0	C8	4,0	10,1
C4	6,9	17,2	C9	9,4	23,6
C5	3,6	9,0	C10	7,5	18,8

Fonte: os autores.

Para o Cenário 1, os resultados apresentados na Tabela 22 indicam que a melhor alternativa a ser aplicada nesta situação seriam as alternativas A1 – Tanque séptico e a A2 – Tanque séptico seguido de filtro anaeróbio, por serem tecnologias relativamente simples e de fácil implantação. Já a tecnologia que pior se

adequaria ao Cenário 1, se adotada para esta situação, é a A6 – Tanque séptico seguido por MBR, devido à sua complexidade, alto custo e necessidade frequente de manutenção. Percebe-se similaridade nos resultados obtidos pelo método ELECTRE-III e o TOPSIS para $p = \infty$.

Tabela 22 – Resultados da simulação nos métodos ELECTRE-III e TOPSIS para o Cenário 1

Ranking	ELECTRE-III	TOPSIS		
	Alternativas	Alternativas C_k^* ($p=1$)	Alternativas C_k^* ($p=2$)	Alternativas C_k^* ($p = \infty$)
1º	A1 e A2	A2	A2	A1 e A2
2º	A3	A1	A3	A3
3º	A4	A3	A1	A4
4º	A5	A4	A4	A5
5º	A6	A5	A5	A6
6º	-	A6	A6	-

C_k^* - coeficiente de similaridade.

Fonte: os autores.

No Cenário 2, há uma restrição maior quanto à confiabilidade do sistema de tratamento, aos possíveis impactos que a tecnologia possa causar ao meio ambiente e à permanência do efluente

dentro dos padrões de lançamento que devem ser alcançados pela Resolução 430/2011 do CONAMA (BRASIL, 2011). Na Tabela 23, evidencia-se que a alternativa A1 fica na pior

posição no *ranking*, para o parâmetro $p = \infty$ no método TOPSIS, dada pelo desvio de maior importância, evidenciando que essa tecnologia não se aplica a locais mais restritivos e sugerindo a necessidade de um refinamento do seu efluente final complementado com pós-tratamento, como no caso das alternativas A2 e A3 (tanque séptico seguido de filtro anaeróbio ou de *Wetland*), que foram as melhores classificadas, e, portanto, mais adequadas para esta situação. Isto sugere que

essas duas alternativas atendem melhor aos requisitos ambientais e são técnica e economicamente viáveis. Porém, para o caso da alternativa A3, a área de terreno ocupada pelo sistema de *Wetland* frequentemente ultrapassa a disponibilidade de área para instalação, e, nesse caso, a alternativa A2 acabaria sendo a melhor solução. Já a alternativa A6 mostra-se novamente como a tecnologia menos adequada para ser implantada nesse Cenário 2.

Tabela 23 – Resultados da simulação nos métodos ELECTRE-III e TOPSIS para o Cenário 2

Ranking	ELECTRE-III	TOPSIS		
	Alternativas	Alternativas C_k^* (p=1)	Alternativas C_k^* (p=2)	Alternativas C_k^* (p = ∞)
1º	A1, A2 e A3	A2	A2 e A3	A2 e A3
2º	A4	A3	A4	A4 e A5
3º	A5	A1	A5	A1 e A6
4º	A6	A4	A1	-
5º	-	A5	A6	-
6º	-	A6	-	-

C_k^* - coeficiente de similaridade.

Fonte: os autores.

No caso do Cenário 3, os valores propostos para os padrões de reúso de água inviabilizam quase todos os sistemas de tratamento quando se opta pelo reúso de água mais restrito, exceto para o tratamento com reator biológico com membrana (MBR). Baseado nisso, fez-se uma pré-triagem das alternativas para o cenário 3, para que fossem avaliadas apenas as que atendessem aos padrões de qualidade. Chegou-se à conclusão de que nem todas estavam em conformidade com os principais parâmetros. Com isso, relaxaram-se um pouco os valores dos padrões de Sólidos Suspensos Totais e Turbidez exigidos para o reúso de água na consideração das alternativas, adicionando as tecnologias que melhor podem se adequar para alcançar os níveis adequados para o reúso de água de Classe 3,

com adaptações no tratamento. As alternativas escolhidas para serem avaliadas nesta etapa foram as seguintes: (A4) UASB seguido de filtro biológico aerado; (A5) UASB seguido por lodos ativados; e (A6) Tanque séptico acompanhado do MBR. Para atender à exigência do Cenário 3, considerou-se que todas essas alternativas teriam ao final a desinfecção do efluente tratado, como recomendado pela NBR 13.969/1997 (ABNT, 1997).

Os padrões adotados foram estabelecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2005) para o reúso de água para irrigação de áreas verdes e rega de jardins. Os resultados da avaliação das tecnologias de tratamento para o Cenário 3 estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados da simulação nos métodos ELECTRE-III e TOPSIS para o Cenário 3

Ranking	ELECTRE-III	TOPSIS		
	Alternativas	Alternativas C_k^* (p=1)	Alternativas C_k^* (p=2)	Alternativas C_k^* (p = ∞)
1º	A4*	A4*	A4*	A6*
2º	A5* e A6*	A5*	A6*	A4*
3º	-	A6*	A5*	A5*

C_k^* - coeficiente de similaridade. A4*. UASB+BAS+desinfecção; A5*. UASB+LAC+desinfecção; A6*. TS+MBR+desinfecção. Fonte: os autores.

Na Tabela 24, pode-se ver que a alternativa A6 seguida de desinfecção ficou em primeiro lugar no *ranking* somente no método TOPSIS com $p = \infty$, em decorrência desse parâmetro refletir a influência do maior desvio, mesmo sendo considerada a alternativa ideal voltada à aplicação para o reúso de água, por ser a única que alcança os padrões atuais brasileiros exigidos. Ao passo que a alternativa A4 (Reator UASB seguido por biofiltro aerado submerso e desinfecção) respondeu como a opção ótima para este cenário. Já a A5 (Reator UASB seguido de lodos ativados e desinfecção) não é recomendável para ser aplicada nesta situação.

4 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, foi desenvolvida uma metodologia simplificada de avaliação tecnológica de processos de tratamento descentralizado de esgotos, específicos para uma residência unifamiliar, utilizando uma abordagem de análise de decisão multiobjetivo e multicritério com variável discreta e construindo o problema para obter uma solução por hierarquização. Na análise tecnológica proposta, por motivo de simplicidade, adotaram-se apenas algumas das dimensões da tecnologia normalmente consideradas, e somente os critérios possíveis de mensuração rápida e simples dessas dimensões. Essa proposta metodológica de avaliação foi testada por um processo de análise de sensibilidade, no qual foram variados os valores dos pesos de cada dimensão e de cada critério.

Essa metodologia de avaliação foi processada para três cenários muito comuns e possíveis de existirem sob as condições brasileiras, incluindo-se as mais remotas regiões do País. Esses cenários foram assim descritos: Cenário 1 – Nível do lençol freático baixo e solo com alta permeabilidade, e risco epidemiológico e ambiental pequeno (o efluente poderá ser infiltrado no solo); Cenário 2 – Nível do lençol freático alto e/ou solo com capacidade de infiltração baixa, e risco epidemiológico e ambiental grande (o efluente deverá ser lançado ao corpo receptor), ou quando é necessário fazer a descarga direta em corpo de água superficial (caso de embarcações, palafitas etc.); e Cenário 3 – Realização de reúso direto não-potável da água em área urbana que sofre com a escassez hídrica (lavagem de roupas e de veículos, descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos

e fins ornamentais, chafarizes, espelhos de água etc.) ou reúso direto não-potável da água em irrigação para locais rurais.

Para o Cenário 1, as melhores alternativas a serem aplicadas nesta situação, como resposta da metodologia desenvolvida, são as alternativas A1 (Tanque séptico) e a A2 (Tanque séptico seguido de filtro anaeróbio), por serem tecnologias simples, com baixo custo e de fácil implantação.

Para o Cenário 2, de modo a atender o nível de confiabilidade desejável para o sistema de tratamento e a permanência do efluente dentro dos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução 430/2011 do CONAMA (BRASIL, 2011), as alternativas A2 e A3 (tanque séptico seguido de filtro anaeróbio e tanque séptico seguido de *Wetland*), são as mais adequadas para este cenário, por atenderem aos requisitos ambientais e serem técnica e economicamente viáveis.

No caso do Cenário 3, a alternativa A6 (Tanque séptico seguido por MBR e desinfecção) é considerada a ideal, por ser a única que atende aos padrões restritivos de reúso da ANA – Agência Nacional de Águas (ANA, 2005). No entanto, a alternativa ótima para este Cenário 3 seria a A4 – Tanque séptico seguido por biofiltro aerado submerso (acrescida de desinfecção), caso fossem relaxados alguns padrões de qualidade organoléptica da água.

A possibilidade ou não de se realizar o reúso de água é o grande divisor entre a adoção ou não da tecnologia MBR. Considerando-se padrões atuais exigidos para a qualidade da água para reúso, pelo valor alcançado para Sólidos Suspensos Totais e Turbidez no efluente das alternativas de tratamento de esgoto normalmente consideradas, somente a tecnologia MBR tem condições de atender a esses critérios de exigência.

Os valores dos padrões de reúso de água que foram relaxados na presente pesquisa não são diretamente relacionados com saúde pública e meio ambiente, mas com a aceitação ou não pelo usuário da água recuperada. Como as alternativas consideradas preveem a desinfecção convencional do efluente final, e se está tratando de reúso não-potável de água, espera-se que se adote no Brasil uma legislação para reúso de água que seja realística, e, portanto, permita que outras alternativas de processos biológicos de tratamento de esgotos, que não a MBR, possam

ser levadas em consideração nos cenários com reúso de água.

A metodologia de análise desenvolvida pode ser utilizada para incluir maiores detalhamentos e aprimoramentos para o caso proposto, ou mesmo para o saneamento em geral (sistemas de esgotos descentralizados plurifamiliares, ou sistemas de esgotos prediais com segregação, por exemplo). Outras dimensões, outros critérios de análise e outra problemática decisória podem ser inseridos. Por exemplo, uma questão importante não capturada pela metodologia proposta é o domínio pela comunidade da tecnologia, a sua “apropriação” pelo País. Sabe-se e é notório que o Brasil não domina ainda a tecnologia de fabricação de membranas robustas, o que torna a adoção da tecnologia MBR um fator de grande dependência pela importação de membranas e equipamentos para funcionamento dos módulos de membranas. Então, para que a metodologia capturasse esse fator, seria necessário que a esta fosse incorporada a dimensão da política tecnológica.

Finalmente, é importante ressaltar que os custos mais altos de implantação e de manutenção da tecnologia MBR tiveram importante influência na análise realizada. Os resultados obtidos com o processamento da metodologia consideraram como dados de entrada os custos registrados no momento desta pesquisa. Entretanto, esses custos devem declinar, e estes resultados obtidos com a metodologia proposta para análise poderão ser alterados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio das seguintes instituições: FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, por meio da RENTED – Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados, pelo auxílio financeiro; e FAPEAM (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas), pela bolsa de pesquisa concedida.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, T. R.; DIXON, M. A. Applicability of MBR technology for decentralized municipal wastewater treatment in Iraq. In: REGIONAL CONFERENCE ON WASTEWATER PURIFICATION & REUSE, 2012, Creta. **Proceedings...** Creta, Grécia, IWA, 2012.
- ABEGGLEN, C. K.; OSPELTA, M.; SIEGRIST, H. Biological nutrient removal in a small-scale MBR treating household wastewater. **Water Research**, v. 42, p. 338-346, 2008.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13.969** – Projeto, Construção e Operação de Sistemas de Tanques Sépticos – Tratamento e Disposição dos Efluentes de Tanques Sépticos. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ALEM SOBRINHO, P. E.; JORDÃO, E. P. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios – Uma análise crítica. In: CHERNICHARO, C. A. L. (Coord.). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte, MG, Brasil: FINEP / Projeto PROSAB. 2001. p. 491-513.
- ALFAMEC. Catálogo de produtos. Ribeirão Pires, SP, Brasil: ALFAMEC Soluções Ambientais. Disponível em: <http://alfamec.com.br/orcamento>. Acesso em: 20 jul. 2016.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Conservação e Reúso da Água em Edificações**. (coautoria do SINDUSCON-SP). São Paulo: Prol Editora Gráfica. 2005. 151p. Disponível em: <https://sitefilesstorage.blob.core.windows.net/uploads/2014/08/conservacao-e-reuso-de-aguas-2005.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2016.
- ANDRADE NETO, C. O.; VAN HAANDEL, A.; MELO, H. N. S. O uso do filtro anaeróbio para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios no Brasil. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 10., 2002, Braga. **Anais...** Braga, Pt: APESB/APRH/ABES, 2002.
- ÁVILA, R. O. **Avaliação do desempenho de sistemas tanque séptico-filtro anaeróbio com diferentes tipos de meio suporte**. 166p. 2005. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- BATTILANI, A.; STEINER, M.; ANDERSEN, M.; BACK, S. N.; LORENZEN, J.; SCHWEITZER, A.; DALSGAARD, A.; FORSLUND, A.; GOLA, S.; KLOPMANN, W.; PLAUBORG, F.; ANDERSEN, M. N. Decentralised water and wastewater treatment technologies to produce functional water for irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 385-402, 2010.
- BOF, V. S.; SANT'ANA, T. D. C.; WANKE, R.; SILVA, G. M.; SALIM, F. P. C.; NARDOTTO, J. I.; SUZART NETTO, E.; PEGORETTI, J. M. ETEs compactas associando reatores anaeróbios e aeróbios ampliam a cobertura do saneamento no Estado do Espírito Santo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, PB: ABES, 2001. Trabalho II-0170.

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução do CONAMA nº 357. **Diário Oficial da União**, 16 de maio de 2011. Brasília: CONAMA. 2011.

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN HAANDEL, A. C.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. Introdução. In: CHERNICHARO, C. A. DE L.; DANIEL, L. A.; SENS, M.; CORAUCCI FILHO, B. (Coord.). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: ABES – FINEP/PROSAB. 2001. 544p.

DELTA SANEAMENTO AMBIENTAL. Catálogo de Equipamentos. Atibaia, SP, Brasil: Delta Saneamento Ambiental. Disponível em: <https://www.deltasaneamento.com.br/>. Acesso em: 20 jul. 2016.

FIGUEIRA, J.; MOUSSEAU, V.; ROY, B. ELECTRE Methods. In: J. FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. (Ed.). **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. Boston, Dordrecht, London: Springer Verlag, 2005. p. 133-162.

FIGUEROA, E. V.; MOL, J. M. D.; SOUZA, M. A. A.; CORDEIRO NETTO, O. M. Aplicabilidade do método de análise multiobjetivo TOPSIS a gestão dos recursos hídricos. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO CENTRO-OESTE, 3., Goiânia, 2004. **Anais...** Goiânia, Go: ABRH, 2004. 13p.

GIACOBBO, A. **Biorreator à membrana aplicado ao tratamento de efluentes**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2010. 77p.

GONÇALVES, R. F.; ARAÚJO, V. L.; CHERNICHARO, C. A. L. Association of a UASB reactor and a submerged aerated biofilter for domestic sewage treatment. **Water Science and Technology**, v. 38, n. 8-9, p. 189-195, 1998.

GUO, X.; LIU, Z.; CHEN, M.; LIU, J.; YANG, M. Decentralized wastewater treatment technologies and management in Chinese villages. **Frontiers of Environmental Sciences & Engineering**, v. 8, n. 6, p. 929-936, 2014.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014. 1087p.

JUDD, S.; JUDD, C. **The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment**. 2. ed. Oxford, UK / Burlington, MA, USA: Elsevier/Butterworth-Heinemann. 2011. 519p.

LEROY MERLIN. Catálogo de Produtos. São Paulo, SP, Brasil: Leroy Merlin Companhia Brasileira de Bricolagem <https://www.leroymerlin.com.br/>. Acesso em: 20 jul. 2016.

LUNA, M. L. D.; SOUSA, J. T.; LIMA, V. L. A.; ALVES, A. S.; PEARSON, H. W. Pós-tratamento de efluente de tanque séptico utilizando filtros intermitentes de areia operando em condições tropicais. **Scientia Plena**, v. 9, n. 9, p. 093-102, 2013.

MOLINOS-SENANTE, M.; GARRIDO-BASERBA, M.; REIF, R.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; POCH, M. Assessment of wastewater treatment plant design for small communities: environmental and economic aspects. **Science of the Total Environment**, v. 427-428, p.11-18, 2012.

OLSON, D. L. Comparison of Weights in TOPSIS Models. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 40, p. 721-727, 2004.

PAM MEMBRANAS. Catálogo de Equipamentos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Pam Membrana Seletivas Ltda. 2015. Disponível em: <https://www.pam-membranas.com.br/>. Acesso em: 18 dez. 2015

PEREIRA, A. R. **Reator biológico com membrana (MBR) aplicado ao tratamento de esgotos gerados por unidades residenciais unifamiliares**. 164p. 2016. (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM - 190/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

ROY, B. The outranking approach and the foundations of Electre methods. **Theory and Decision**, v. 31, p. 49-73, 1991. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers. (<https://doi.org/10.1007/BF00134132>)

SADR, S. M. K.; ONDER, T.; SAROJ, D. P.; OUKI, S. K. Appraisal of membrane processes for technology selection in centralized wastewater reuse scenarios. **Sustainable Environmental Research**, v. 23, n. 2, p. 69-78, 2013.

_____; SAROJ, D. P.; KOUCHAKI, S.; ILEMOBADE, A. A.; OUKI, S. K. A group decision-making tool for the application of membrane technologies in different water reuse scenarios. **Journal of Environmental Management**, v. 156, p. 97-108, 2015.

SANTASMASAS, C.; ROVIRA, M.; CLARENS, F.; VALDERRAMA, C. Grey water reclamation by decentralizes MBR prototype. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 72, p.102-107, 2013.

SARTOR, M.; KASCHEK, M.; MAVROV, V. Feasibility study for evaluating the client application of membrane bioreactor (MBR) technology for decentralised

municipal wastewater treatment in Vietnam. **Desalination**, v. 224, n. 1-2, p. 172-177, 2008.

SHIH, H. S.; SHYUR, H. J.; LEE, S. An extension of TOPSIS for group decision making. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 45, p. 801-813, 2007.

SKOUTERIS, G.; ARNOT, T. C.; FEKI, F.; JRAOU, M.; SAYADI, S. Operation of a submerged aerobic membrane bioreactor for decentralised municipal wastewater treatment in North Africa. **Water Practice & Technology**, v. 7, n. 3, 2012. doi:10.2166/wpt.2012.055

SLOWINSKI, R.; ROY, B.; GRECO, S.; FIGUEIRA, J. An overview of ELECTRE methods and their recent extensions. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 20, n. 1-2, p. 61-85, 2013.

TAI, C. S.; SNIDER-NEVIN, J.; DRAGASEVICH, J.; KEMPSON, J. Five years operation of a decentralized

membrane bioreactor package plant treating domestic wastewater. **Water Practice & Technology**, v. 9, n. 2, 2014. (doi: 10.2166/wpt.2014.024)

TEGA. Catálogo de Equipamentos. Cordeirópolis, SP, Brasil: Tega Engenharia e Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.tegaengenharia.com.br/>. Acesso em: 20 jul. 2016.

USEPA. United States Environment Protection Agency. **On site wastewater treatment systems manual**. Office of Water. Office of Research and Development. EPA-625-R-00-008. Washington, DC, USA: Government Printing Office, 2002.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte, MG, Brasil: UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais / DESA – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005. 116p. V. 1.