



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Amanda Kempt Schroeder

**Avaliação de tecnologias normatizadas e wetlands construídos empregados no  
tratamento descentralizado de esgoto por meio de análise multicriterial**

FLORIANÓPOLIS

2020

Amanda Kempt Schroeder

**Avaliação de tecnologias normatizadas e wetlands construídos empregados no  
tratamento descentralizado de esgoto por meio de análise multicriterial**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Ambiental.  
Orientador: Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schroeder, Amanda Kempt

Avaliação de tecnologias normatizadas e wetlands  
construídos empregados no tratamento descentralizado de  
esgoto por meio de análise multicriterial / Amanda Kempt  
Schroeder ; orientador, Pablo Heleno Sezerino, 2020.

139 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Tratamento Descentralizado.  
3. Wetlands Construídos. 4. Tomada de Decisão. 5. Método  
Analítico Hierárquico. I. Sezerino, Pablo Heleno. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Amanda Kempt Schroeder

**Avaliação de tecnologias normatizadas e wetlands construídos empregados no tratamento descentralizado de esgoto por meio de análise multicriterial**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Maria Elisa Magri, Dr.(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. EneDIR Ghisi, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dirceu Scaratti, Dr.  
Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

---

Prof.(a) Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.(a)  
Coordenador(a) do Programa

---

Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.  
Orientador(a)

Florianópolis, 2020.

## AGRADECIMENTOS

Encerro mais uma etapa da minha vida, mas não atravessei ela sozinha. Por isso, preciso dedicar esta parte deste trabalho para agradecer algumas pessoas e entidades que tiveram um papel importante para que eu pudesse alcançar o título de Mestre em Engenharia Ambiental. Deixo aqui registrado os meus agradecimentos:

Ao professor Pablo H. Sezerino, um grande e excelente orientador, com o qual tive a oportunidade de aprender muito com todas as discussões motivadoras. Agradeço também por toda dedicação em me orientar e pelo constante incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais, Christiani e Amilton, por não medirem esforços para me proporcionar educação de qualidade, e por sempre me apoiarem e incentivarem em minhas decisões.

Aos colegas do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD): Arieleen, Amanda, Aline, Alexandre, Catiane, Larissa, Leandro, Luciane, Mayara e Victor. Foi um privilégio poder trabalhar e dividir meu dia a dia com vocês. Tive o prazer de poder aprender mais com a experiência e o conhecimento de cada um. Agradeço por todas as risadas e bons momentos de descontração que tivemos juntos.

A todos meus amigos que fizeram com que essa caminhada fosse mais animada. Em especial, agradeço a minha querida amiga Lorena, por estar sempre perto, desde a graduação, vibrado com cada conquista, e por me incentivar e tranquilizar nos momentos de angústia.

Aos professores Maria Elisa Magri, Enedir Ghisi e Dirceu Scaratti, pelo aceite em participar da banca avaliadora, pelo tempo dedicado com a leitura e por todas as considerações visando a melhoria do trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por proporcionar todo o estudo e aprendizagem adquiridos na graduação e, agora, no mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de mestrado.

A todos os professores por compartilharam comigo seus conhecimentos e por contribuírem para minha formação acadêmica.

Ao final dessa etapa de tanto aprendizado alcancei um crescimento não só acadêmico, mas também pessoal e profissional. Diante disso, não posso deixar de agradecer a Deus por me proporcionar mais essa oportunidade de cursar o mestrado.

Essa jornada foi muito mais leve com vocês. Muito obrigada!

## RESUMO

Diversas são as tecnologias de tratamento de esgoto disponíveis e capazes de cumprir uma ampla gama de padrões de lançamento, fornecer serviços adequados e benefícios ao meio ambiente. No entanto, o sucesso na escolha da alternativa envolve a análise de vários fatores, o que torna esse processo bastante complexo e, por isso, muitas vezes é necessária a aplicação de métodos de tomada de decisão com multicritério. Nesse contexto, o presente trabalho avaliou comparativamente, a partir de uma análise multicriterial, tecnologias normatizadas e não normatizadas do tipo wetlands construídos (WC) como alternativas ao tratamento descentralizado de esgoto. O Método Analítico Hierárquico (AHP) foi utilizado para selecionar a tecnologia mais adequada ao tratamento descentralizado de um cenário proposto para 150 habitantes. Foram avaliadas 2 tecnologias normatizadas (filtro anaeróbio – FAN e lodo ativado em batelada – LAB) e 3 modalidades de WC (de fluxo vertical – WCV, de fluxo horizontal – WCH e a combinação dessas duas configurações, formando um sistema híbrido – SH). Para este estudo, a escolha da tecnologia se baseou na sustentabilidade de cada sistema, abrangendo aspectos econômicos, ambientais e sociais. Para isso, foram avaliados os custos de construção (CAPEX), operação e manutenção (OPEX), as eficiências de remoção de matéria orgânica (EMO), sólidos suspensos (ESS) e nutrientes (EN), o requerimento por área (AR) e energia (ER), a produção de lodo (LP) e aspectos de aceitação do público, relacionados com as características do tratamento e do efluente (CTE), bem como a complexidade de construção e operação (CCO). Essas informações foram obtidas através do dimensionamento das tecnologias, levantamento de custos e pesquisa bibliográfica. Considerando esses múltiplos fatores e a incorporação da opinião de um grupo de tomada de decisão, composto por representantes de instituições de ensino superior, analistas ambientais, projetistas e construtores, concessionária do saneamento e usuários, foi calculado um indicador composto para cada alternativa tecnológica, através do método AHP, que as classificou em prioridades de escolha. Para o grupo de decisores, a dimensão ambiental foi considerada a mais importante (56%) para definir a tecnologia mais sustentável, seguida pela econômica (32%) e social (12%). Com relação aos indicadores de sustentabilidade, os mais influentes na decisão foram: OPEX (para a dimensão econômica), EMO (para dimensão ambiental) e CCO (para dimensão social). Dessa forma, o WCH foi a alternativa melhor classificada (26%), seguida pelo SH (22%), FAN (21%), WCV (17%) e LAB (15%). Essa classificação para os extremos pode ser atribuída, sobretudo, pelo elevado OPEX (R\$ 118 hab<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>) e complexidade de operação para o LAB, enquanto que o contrário foi observado para o WCH, que apresentou o menor OPEX (R\$ 7 hab<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>) e certa simplicidade para construção e operação. Com relação ao CAPEX, o FAN foi a tecnologia que obteve o menor valor (R\$ 80 hab<sup>-1</sup>) seguido do WCH (R\$ 325 hab<sup>-1</sup>), que apresentou valor semelhante ao LAB (R\$ 335 hab<sup>-1</sup>). O WCV e SH apresentaram os CAPEX mais elevados (R\$ 436 hab<sup>-1</sup> e R\$ 629 hab<sup>-1</sup>, respectivamente). Porém, considerando os custos totais (CAPEX+OPEX) ao longo da vida útil (15 anos), observou-se que apesar do LAB apresentar inicialmente custos semelhantes ou inferiores às modalidades de WC, até o terceiro ano o cenário muda e o LAB passa a ser a tecnologia com as maiores despesas totais. Ao final destes 15 anos, essas despesas resultam em um montante de 7,5 vezes maior que o FAN, e 2,4 vezes maior que o SH. O produto deste estudo tende a contribuir para facilitar o acesso dos tomadores de decisão e partes interessadas a uma interpretação de um problema complexo e multidimensional. Além disso, também fornece um contexto valioso para os gestores e poder público na aprovação e implementação de tecnologias de tratamento não normatizadas.

**Palavras-chave:** Método Analítico Hierárquico. Tomada de Decisão. Análise Multicriterial. Tecnologia Sustentável. Tratamento Descentralizado.

## ABSTRACT

There are several wastewater treatment technologies available and capable of meeting a wide range of discharge standards, providing adequate services and benefits to the population and environment. However, the success in choosing an alternative involves the analysis of several factors, which makes this process quite complex and, therefore, it is often necessary to apply multi-criteria decision making methods. In this context, this study comparatively evaluated based on a multi-criteria analysis standardized and non-standardized technologies such as constructed wetlands (CW) as alternatives for the decentralized wastewater treatment. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to select the most appropriate technology for the decentralized treatment of a proposed scenario for 150 inhabitants. Two standardized technologies were evaluated (anaerobic filter - ANF and sequential batch reactor - SBR), and 3 modalities of CW (vertical flow – VCW, horizontal flow – HCW, and the combination of these two configurations, composing a hybrid system - HS). The choice of technology was based on the sustainability of each system, including economic, environmental, and social aspects. Given that, the criteria evaluated were: capital expenditure (CAPEX), operational expenditure (OPEX), efficiency of removal of organic matter (EOM), suspended solids (ESS), nutrients (EN), area requirement (RA), energy requirement (RE), sludge production (SP), and aspects of public acceptance related to the characteristics of treatment and effluent (CTE), as well as the complexity of construction and operation (CCO). These information were obtained through the dimensioning of the technologies, cost surveys, and bibliographic research. A composite indicator was calculated for each technological alternative through the AHP, considering these multiple factors and the incorporation of the opinion of a group of judges. This composite indicator ranks technological alternatives as a priority of choice. The jury was composed of representatives from higher education institutions, environmental analysts, designers and builders, the sanitation concessionaire, and users. For the jury, the environmental dimension was the most important (56%) to define the most sustainable technology, followed by economic (32%), and social (12%) aspects. Regarding sustainability indicators, the most influential in their decision were: OPEX (for the economic dimension), EOM (for the environmental dimension), and CCO (for the social dimension). Thus, HCW was the best-classified alternative (26%), followed by HS (22%), ANF (21%), VCW (17%), and SBR (15%). This classification for the first and last ranked technologies can be attributed, mainly, to the high OPEX (R\$ 118 PE<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup>) and complexity of operation of the SBR, while the opposite was observed for the HCW, which presented the lowest OPEX (R\$ 7 PE<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup>) and some ease of construction and operation. Regarding CAPEX, ANF was the technology that obtained the lowest cost (R\$ 80 PE<sup>-1</sup>), followed by HCW (R\$ 325 PE<sup>-1</sup>), which presented a similar cost to SBR (R\$ 335 PE<sup>-1</sup>). The VCW and HS had the highest CAPEX (R\$ 436 PE<sup>-1</sup> and R\$ 629 PE<sup>-1</sup>, respectively). However, considering the total costs (CAPEX + OPEX) over the useful life (15 years), it was observed that, although the BAS initially presented costs similar or lower than the variations of CW, this scenario changed after the third year and the SBR became the technology with the highest total costs. At the end of these 15 years, these costs resulted in an amount of 7.5 times greater than the ANF, and 2.4 times greater than the HS. The results of this study aim to contribute to facilitate the access of decision makers and interested parties to an interpretation of a complex and multidimensional problem. Furthermore, it also provides valuable information for managers and public authorities to approve and implement non-standardized treatment technologies.

**Keywords:** Analytic Hierarchy Process. Decision Making. Multicriterial Analysis. Sustainable Technology. Decentralized Treatment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos wetlands construídos. ....	29
Figura 2 - Esquema do perfil longitudinal de um wetland construído horizontal. ....	30
Figura 3 - Esquema do perfil longitudinal de um wetland construído vertical descendente. ....	31
Figura 4 - Esquema do perfil longitudinal de um sistema híbrido.....	31
Figura 5 - Estrutura hierárquica genérica de problema de decisão.....	36
Figura 6 - Estrutura hierárquica do problema de decisão "escolha da tecnologia de tratamento descentralizado de esgoto mais adequada", pela abordagem do método AHP.....	46
Figura 7 - Exemplo de estrutura hierárquica genérica para cálculo de vetor prioridade global. ....	49
Figura 8 - Esquemas dos arranjos tecnológicos (AT) analisados empregados no tratamento descentralizado de esgoto de um equivalente populacional de 150 pessoas. ....	56
Figura 9 - Disposição do material filtrante em WCH (vista de perfil). ....	60
Figura 10 - Disposição do material filtrante em WCV (vista de perfil). ....	60
Figura 11 - Disposição do material filtrante em sistema híbrido (vista de perfil). ....	61
Figura 12 – Fotos ilustrativas de wetlands construídos implantados em escala real com modo de construção escavado no solo, sem alvenaria em concreto. ....	66
Figura 13 – Fotos ilustrativas de lodo ativado em batelada (a e c) e filtro anaeróbio (b e d) implantados em escala real com modo de construção escavados no solo com alvenaria em concreto.....	66
Figura 14 - Tubulações de distribuição e coleta do efluente nos wetlands.....	68
Figura 15 - Valores de CAPEX + OPEX para as tecnologias estudadas e empregadas no tratamento de esgoto de um equivalente populacional de 150 pessoas, sob horizonte de projeto de 15 anos. ....	90
Figura 16 - Discriminação do CAPEX levantado para as tecnologias estudadas e empregadas para o tratamento de esgoto de uma comunidade com um equivalente populacional de 150 pessoas, sob um horizonte de projeto de 15 anos. ....	93
Figura 17 - Discriminação do OPEX levantado para as tecnologias estudadas e empregadas para o tratamento de esgoto de uma comunidade com um equivalente populacional de 150 pessoas, sob um horizonte de projeto de 15 anos.....	93
Figura 18 - Pesos de preferência (ou vetores de prioridade local) das dimensões e indicadores de sustentabilidade expressos em porcentagem. ....	98



Figura 19 - Vetor prioridade global para as alternativas tecnologias estudadas.....	100
Figura 20 - Preferência do grupo de decisores na comparação entre pares das dimensões de sustentabilidade.....	130
Figura 21 - Preferência do grupo de decisores na comparação entre pares dos indicadores econômicos, ambientais e sociais. ....	131

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características gerais das tecnologias de tratamento e efluente final para as tecnologias estudadas.....	86
Quadro 2 - Complexidade de construção e operação para as tecnologias estudadas.....	88
Quadro 3 - CAPEX e OPEX levantados para as tecnologias estudadas e empregadas para o tratamento de esgoto de uma comunidade com um equivalente populacional de 150 pessoas, sob um horizonte de projeto de 15 anos.....	92
Quadro 4 - Resumo dos critérios de sustentabilidade relacionados às tecnologias estudadas e empregadas para o tratamento de esgoto de um equivalente populacional de 150 habitantes, sob um horizonte de projeto de 15 anos.....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das tecnologias apresentadas na NBR 13969 (ABNT, 1997) para tratamento de efluente líquido de tanque séptico. Continua.....	25
Tabela 2 - Escala fundamental de Saaty aplicada para obter os valores de importância pelo AHP. ....	37
Tabela 3 - Conjunto de indicadores de sustentabilidade para escolha da alternativa tecnológica. ....	45
Tabela 4 - Matriz de decisão.....	47
Tabela 5 - Índice de Coerência Aleatória (RI).....	51
Tabela 6 - Composição do grupo de tomada de decisão.....	53
Tabela 7 – Duração das fases do ciclo operacional do LAB. ....	57
Tabela 8 - Parâmetros de projeto para dimensionamento do filtro anaeróbio e lodo ativado por batelada. ....	59
Tabela 9 - Parâmetros de projeto para dimensionamento dos wetlands construídos.....	62
Tabela 10 - Dimensões das tecnologias de tratamento. ....	63
Tabela 11 - Relativização de área e volume por habitante. ....	63
Tabela 12 - Itens que compõem os custos de construção – CAPEX. ....	65
Tabela 13 - Custo de materiais para construção dos sistemas com WC.....	70
Tabela 14 - Custos de materiais para construção do FAN e LAB. ....	70
Tabela 15 - Quantitativo de equipamentos necessários relacionados às tecnologias dimensionadas.....	72
Tabela 16 - Quantitativo de maquinários empregados na construção das tecnologias estudadas. ....	73
Tabela 17 - Quantitativo de serviços empregados na construção das tecnologias estudadas...	74
Tabela 18 - Itens que compõem os custos de operação e manutenção – OPEX das tecnologias estudadas.....	75
Tabela 19 - Consumo de energia para operação do WCV e Sistema Híbrido.....	76
Tabela 20 - Consumo de energia para operação do LAB.....	76
Tabela 21 - Custos com remoção de lodo nas unidades FAN e LAB.....	77
Tabela 22 - Custo mensal com operador para os sistemas estudados, exceto FAN. ....	78
Tabela 23 - Custo anual com conserto de equipamentos para WCV, sistema híbrido e LAB.	78

Tabela 24 - Eficiências globais de tratamento para o arranjo tecnológico compreendido por tanque séptico seguido de pós tratamento com as unidades estudadas.....	81
Tabela 25 - Eficiências de tratamento relativa às tecnologias estudadas pós TS. ....	82
Tabela 26 - Escala fundamental de Saaty com valores de importância para o método AHP .	117
Tabela 27 - Dimensionamento de wetlands construído horizontal para um equivalente populacional de 150 habitantes.....	120
Tabela 28 - Dimensionamento de wetlands construído vertical para um equivalente populacional de 150 habitantes.....	121
Tabela 29 - Dimensionamento de wetlands construído horizontal componente do sistema híbrido para um equivalente populacional de 150 habitantes.....	122
Tabela 30 - Dimensionamento de filtro anaeróbio para um equivalente populacional de 150 habitantes.....	123
Tabela 31 - Dimensionamento de lodo ativado em batelada para um equivalente populacional de 150 habitantes.....	123
Tabela 32 - Quantitativo de materiais para construção de WCH.....	124
Tabela 33 - Quantitativo de materiais para construção de WCV.....	124
Tabela 34 - Quantitativo de materiais para construção do sistema híbrido (WCV+WCH)....	124
Tabela 35 - Quantitativo de materiais para construção do FAN.....	125
Tabela 36 - Quantitativo de materiais para construção do LAB.....	125
Tabela 37 - Quantitativo de equipamentos .....	126
Tabela 38 - Quantitativo de maquinários.....	126
Tabela 39 - Quantitativo de mão de obra para o wetland construído horizontal. ....	126
Tabela 40 - Quantitativo de mão de obra para o wetland construído vertical. ....	127
Tabela 41 - Quantitativo de mão de obra para o sistema híbrido .....	127
Tabela 42 - Quantitativo de mão de obra para o filtro anaeróbio. ....	128
Tabela 43 - Quantitativo de mão de obra para o lodo ativado em batelada.....	128
Tabela 44 – Intensidade de importância atribuída à comparação pareada entre elementos das dimensões e indicadores de sustentabilidade com base na diferença entre porcentagens de preferência desses elementos. ....	132
Tabela 45 – Preferências e intensidade de importância atribuídas para comparações pareadas entre elementos das dimensões e indicadores ambientais.....	133
Tabela 46 - Vetores de prioridade local expresso em porcentagem das dimensões e indicadores de sustentabilidade .....	134

Tabela 47 - Razão de consistência das matrizes de decisão para definição dos pesos de importância das dimensões e indicadores de sustentabilidade. ....	134
Tabela 48 - Escalas adotadas para a comparação das alternativas à luz dos indicadores econômicos e sociais. ....	136
Tabela 49 - Escalas adotadas para a comparação das alternativas à luz dos indicadores ambientais. ....	136
Tabela 50 - Vetores de prioridade local expresso em porcentagem para as alternativas tecnológicas. ....	138
Tabela 51 - Razão de consistência das matrizes de decisão para definição dos pesos de importância das alternativas tecnológicas à luz dos indicadores. ....	139

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AHP – Analytic Hierarchy Process (Método Analítico Hierárquico)

ANP – Analytic Network Process (Método de Análise em Rede)

AR – Área Requerida

ART – Anotação de Responsabilidade Técnica

AT – Arranjo Tecnológico

CAPEX – Capital Expendure (Custo de Construção)

CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento

CCO – Complexidade de Construção e Operação

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina

CTE – Característica do Tratamento e Efluente Final

CONAMA – Conselho Nacional do Meio ambiente

COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

DBO<sub>5</sub> – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ELECTRE – (Elimination et Choix Traduisant la Réalité)

EMO – Eficiência de Remoção de Matéria Orgânica

EN – Eficiência de Remoção de Nutrientes

ENS – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

EPA – United States Environmental Protection Agency

ER – Energia Requerida

ESS – Eficiência de Remoção de Sólidos Suspensos

ETE – Estações de Tratamento de Esgoto

FAEMA – Fundação Municipal de Meio Ambiente de Blumenau

FAMABI – Fundação Municipal de Meio Ambiente de Biguaçu

FAN – Filtro Anaeróbio

FLORAM – Fundação Municipal do Meio Ambiente de Florianópolis

FUNDEMA – Fundação Municipal de Meio Ambiente de Balneário Piçarras

GESAD – Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS (continuação)

IMA – Instituto do Meio Ambiente  
IWA – International Water Association  
LAB – Lodo Ativado em Batelada  
LP – Lodo Produzido  
MACBETH – Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique  
MAUT – Multiple Attribute Utility Theory  
MCDM – Multicriteria Decision Making (Tomada De Decisão Multicritério)  
MO – Matéria Orgânica  
NBR – Norma Brasileira  
NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N – Nitrogênio Amoniacal  
NT – Nitrogênio Total  
OECD – Organisation for Economic Co-Operation and Development  
OPEX – Operational Expendure (Custo de Operação e Manutenção)  
PASEP – Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público  
PEAD – Polietileno de Alta Densidade  
PIS – Programa de Integração Social  
PROMETHEE – Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation  
PT – Fósforo Total  
RC – Razão de Consistência  
RI – Random Consistency Index (Índice de Coerência Aleatória ou Índice Randômico)  
SH – Sistema Híbrido  
SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil  
SST – Sólidos Suspensos Totais  
TODIM – Tomada de Decisão Interativa Multicritério;  
TOPSIS – Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution  
TS – Tanque Séptico  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
VPG – Vetor Prioridade Global  
VPL – Vetor Prioridade Local  
VS – Vigilância Sanitária  
WC – Wetlands Construídos

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS (continuação)**

WCH – Wetland Construído Horizontal

WCV – Wetland Construído Vertical

WCV-FS – Wetland Construído Vertical de Fundo Saturado



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
1.1	OBJETIVOS .....	22
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>22</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
2.1	TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE ESGOTO .....	23
2.2	TECNOLOGIAS NORMATIZADAS PARA TRATAMENTO DE ESGOTO ...	24
2.3	WETLANDS CONSTRUÍDOS.....	27
<b>2.3.1</b>	<b>Classificação dos wetlands construídos.....</b>	<b>27</b>
2.3.1.1	<i>Wetland Construído Horizontal (WCH) .....</i>	<i>28</i>
2.3.1.2	<i>Wetland Construído Vertical (WCV) .....</i>	<i>30</i>
2.3.1.3	<i>Sistema Híbrido .....</i>	<i>31</i>
2.4	ESCOLHA DA TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	32
2.5	MÉTODO MULTICRITÉRIO DE TOMADA DE DECISÃO.....	33
2.6	ANÁLISE HIERÁRQUICA DO PROCESSO (AHP) .....	35
<b>2.6.1</b>	<b>Vantagens e limitações do AHP .....</b>	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
3.1	TECNOLOGIAS AVALIADAS .....	39
3.2	INDICADORES PARA AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE ESGOTO .....	40
<b>3.2.1</b>	<b>Indicadores econômicos.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Indicadores ambientais.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Indicadores sociais .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Conjunto de critérios de sustentabilidade para escolha da alternativa tecnológica .....</b>	<b>44</b>
3.3	PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO .....	45

3.3.1	<b>Estrutura hierárquica do problema</b> .....	45
3.3.2	<b>Comparação entre elementos e atribuições de valores de importância</b> .....	46
3.3.3	<b>Matriz de julgamentos</b> .....	47
3.3.4	<b>Vetor prioridade local</b> .....	48
3.3.5	<b>Vetor prioridade global</b> .....	48
3.3.6	<b>Medida de consistência</b> .....	50
3.4	COMPOSIÇÃO DO GRUPO DE TOMADA DE DECISÃO .....	52
3.5	DEFINIÇÃO DAS FRONTEIRAS LIMITANTES DA APLICAÇÃO DO ESTUDO.....	54
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	56
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS ARRANJOS TECNOLÓGICOS EMPREGADOS NO TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE ESGOTO.....	56
4.1.1	<b>Reservatórios para armazenamento e equipamentos eletromecânicos</b> .....	57
4.1.2	<b>Produção de lodo</b> .....	58
4.2	DIMENSIONAMENTO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	58
4.2.1	<b>Tecnologias normatizadas</b> .....	59
4.2.2	<b>Wetlands Construídos</b> .....	59
4.2.3	<b>Resultados do dimensionamento das tecnologias</b> .....	62
4.3	PRODUÇÃO DE LODO .....	64
4.4	CUSTOS DE CONSTRUÇÃO - CAPEX .....	64
4.4.1.1	<i>Materiais</i> .....	67
4.4.1.2	<i>Equipamentos eletromecânicos</i> .....	71
4.4.1.3	<i>Maquinários</i> .....	72
4.4.1.4	<i>Serviços</i> .....	73
4.5	CUSTOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO – OPEX .....	74
4.5.1	<b>Consumo energético</b> .....	75

4.5.2	<b>Remoção de lodo excedente das unidades de tratamento FAN e LAB .....</b>	<b>76</b>
4.5.3	<b>Operador para o sistema e conserto de equipamentos .....</b>	<b>77</b>
4.6	EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO .....	79
4.7	ACEITAÇÃO DO PÚBLICO COMO ASPECTO SOCIAL .....	83
4.7.1	<b>Características gerais da tecnologia de tratamento e do efluente final.....</b>	<b>83</b>
4.7.2	<b>Complexidade de construção e operação .....</b>	<b>86</b>
4.8	RESUMO DO CAPEX E OPEX DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS ...	89
4.8.1	<b>Discriminação dos custos.....</b>	<b>93</b>
4.9	RESUMO DOS CRITÉRIOS DE SUSTENTABILIDADE PARA AS TECNOLOGIAS.....	94
4.10	CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP.....	98
5	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>102</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>106</b>
	<b>APÊNDICE A – Questionário para o grupo de tomada de decisão .....</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICE B – Dimensionamento das tecnologias .....</b>	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE C – Quantitativo de materiais necessários à construção das tecnologias.....</b>	<b>124</b>
	<b>APÊNDICE D – Obtenção dos vetores de prioridade local e global para as tecnologias utilizando o método AHP .....</b>	<b>129</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Por muito tempo acreditou-se que a centralização dos sistemas de tratamento fosse a única solução, ou a mais conveniente, na ampliação dos serviços de esgotamento sanitário para as cidades brasileiras. Porém, atualmente os problemas e limitações dessa abordagem estão surgindo progressivamente. Esses sistemas centralizados coletam e tratam grandes volumes de esgoto, mas para isso envolvem custos elevados de construção e operação, que na sua maioria, não são absorvidos por comunidades rurais, de baixa renda ou de baixa densidade populacional (MASSOUD; TARHINI; NASR, 2009). No Brasil, segundo dados recentes do Atlas de Esgoto (ANA, 2017), apenas 43% da população urbana é atendida por sistema coletivo de esgoto, isto é, encaminham seus esgotos à rede coletora e estação de tratamento.

Com isso, a alternativa descentralizada ganha mais atenção como uma forma de ampliar o acesso ao esgotamento sanitário, principalmente no que se refere a menor necessidade de recursos e a sustentabilidade ecológica. Em Santa Catarina, essa abordagem é ainda mais atrativa, tendo em vista que somente 24,26% dos esgotos gerados nas zonas urbanas são encaminhados ao sistema coletivo (ANA, 2017). Além disso, no estado catarinense cidades pequenas com menos de 20 mil habitantes predominam numericamente. De acordo com o IBGE (2018), estas cidades representam 77% do total de municípios. Para essas cidades de pequeno porte, a solução para o tratamento e destinação final dos esgotos pode demandar sistemas mais simplificados (ANA, 2017).

Entre os sistemas descentralizados o tanque séptico é a tecnologia mais comumente conhecida para tratamento primário de efluentes no lote (*on site systems*). No entanto, essa unidade apresenta capacidade limitada na remoção de matéria orgânica e ausência de eficiência na remoção de nutrientes e patógenos, demandando, em geral, um pós-tratamento (CHERNICHARO *et al.*, 2006).

Como tratamento complementar ao tanque séptico, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997), através da NBR 13969/97, apresenta como possíveis unidades os filtros anaeróbios, aeróbios e com areia, as valas de filtração, o lodo ativado por batelada e as lagoas com plantas aquáticas. Além desses, existem outras tecnologias muito difundidas mundialmente, mas que até o momento não foram normatizadas. Massoud, Tarhini e Nasr (2009) citam as lagoas de estabilização e os wetlands construídos (WC).

Os WC são sistemas naturais de tratamento que podem ser usados para fornecer de forma parcial ou total as funções de tratamento secundário e superior (KADLEC; WALLACE, 2009). Eles permitem, dependendo da combinação e tipologia, a obtenção de um efluente final com reduzidas concentrações de matéria orgânica carbonácea e de sólidos em suspensão, bem como são capazes de transformar as frações nitrogenadas, reter fósforo e promover o decaimento bacteriano (PHILIPPI; SEZERINO, 2004).

Desenvolvimentos científicos e tecnológicos abriram caminho para vários processos de tratamento que são capazes de cumprir uma ampla gama de padrões de lançamento no ambiente, fornecendo serviços adequados e benefício para a saúde. No entanto, a pura disponibilidade de tecnologias bem-sucedidas não é por si só suficiente (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2011). Entender o ambiente de recebimento é crucial para a seleção de tecnologia, e deve ser realizado por meio de um processo abrangente de avaliação. Dessa forma, a tomada de decisão não está relacionada a um único critério de julgamento, mas sim a um conjunto de variáveis, muitas vezes conflitantes. Fato esse que torna o processo de escolha bastante complexo. Segundo Massoud, Tarhini e Nasr (2009), o sucesso está na seleção da tecnologia economicamente viável, ambientalmente sustentável e socialmente aceitável.

Nesse contexto, em decorrência da necessidade de saneamento básico para as áreas não abrangidas pelo sistema centralizado e da proteção ao meio ambiente, o presente trabalho busca avaliar os sistemas de tratamento descentralizado não normatizados do tipo wetlands construídos, e compará-los com as tecnologias já normatizadas pela ABNT e amplamente difundidas. Nessa comparação serão consideradas as variáveis econômicas, ambientais e sociais, como custos envolvidos com implantação, manutenção e operação, necessidade de área e energia, eficiências de tratamento, produção de lodo, características gerais do tratamento e do efluente final e complexidade de construção e operação. Para auxiliar o processo de decisão da tecnologia com base em vários critérios, utilizou-se o Método Analítico Hierárquico (AHP), conhecido como um método de Tomada de Decisão com Múltiplos Critérios.

Esse estudo insere-se no rol de trabalhos desenvolvidos pelo Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD). Desde sua criação, em 2004, o GESAD objetiva o desenvolvimento e a disseminação de pesquisas direcionadas às melhorias do saneamento, envolvendo principalmente a ecotecnologia de wetlands construídos. Referência em âmbito nacional de estudos com WC, o GESAD tem desenvolvido trabalhos com diferentes

configurações desse sistema, destacando-se: wetlands construídos de fluxo horizontal (WCH) (GUIMARÃES, 2013; ROUSSO, 2014); de fluxo vertical (WCV) (PELISSARI, 2017); de fluxo vertical com fundo saturado (WCV-FS) (SANTOS, 2015; TREIN, 2015) e sistemas híbridos (SEZERINO, 2006; ROUSSO, 2017).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar, sob o ponto de vista da sustentabilidade econômica, ambiental e social, tecnologias normatizadas e não normatizadas do tipo wetlands construídos como alternativas ao tratamento descentralizado de esgoto, empregando-se uma análise multicriterial.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Relativizar os aspectos econômicos, ambientais e sociais para cada alternativa tecnológica analisada neste estudo;
- ii. Identificar as preferências de um grupo de decisores ligados ao saneamento a respeito das dimensões e indicadores econômicos, ambientais e sociais, considerando a seleção da tecnologia sustentável para pequenas comunidades não atendidas pelo sistema de tratamento centralizado;
- iii. Classificar as alternativas tecnológicas por prioridade de escolha a partir de um indicador composto, resultante da incorporação das preferências do grupo de decisores e do desempenho das tecnologias sobre os critérios de sustentabilidade.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE ESGOTO

Os sistemas de tratamento descentralizados de esgoto são definidos principalmente pelo fato das águas residuárias, em pequenos volumes, serem tratadas próximas da fonte geradora (CRITES; TCHOBANOGLOUS, 1998; WILDERER; SCHREFF, 2000).

Na maioria dos casos, a opção de descentralização do tratamento é adotada somente quando a construção de um sistema de coleta de esgoto dito convencional ou centralizado não é viável economicamente. Todavia, tal concepção está modificando-se. Os processos descentralizados não apenas estão cada vez mais capazes de satisfazer os requisitos tradicionais do tratamento centralizado, como também apresentam algumas vantagens em relação a ele.

Quando o efluente é tratado próximo à fonte geradora, pode-se evitar os grandes diâmetros das tubulações de transporte e as grandes distâncias a serem percorridas, além de reduzir a necessidade de expandir as plantas de tratamento existentes para atender às projeções de crescimento futuras (METCALF; EDDY, 2014). Libralato, Ghirardini e Avezzù (2012) também citam como vantagens da descentralização a melhor eficiência de remoção de nutrientes; a aplicação em vários níveis de escala, desde individual até comunidades; a possibilidade de separação dos contaminantes na fonte; e a reutilização do efluente tratado. Além disso, esses sistemas se ajustam melhor às áreas rurais ou em desenvolvimento, aos centros urbanos dispersos, às comunidades isoladas ou às localidades com relevo acidentado.

Sistemas de tratamento descentralizados podem variar de sistemas *on site* (ou no local) aos sistemas de *cluster* (ou em grupo). Um sistema *on site* coleta, trata, destina/recupera as águas residuais de uma única habitação ou edifício. Já o sistema de *cluster* recolhe e trata as águas residuais de duas ou mais habitações ou edifícios, e as transporta para um único sistema de tratamento e destinação final em um local adequado próximo das fontes geradoras (EPA, 2004a). Massoud, Tarhini e Nasr (2009) ainda classificam um terceiro nível: o de grandes blocos, com edifícios de escolas, hospitais e *shopping centers*, que também pode apoiar a reutilização direta de águas residuais tratadas, feita geralmente no local.

Em relação aos níveis de tratamento de esgoto, esses são usualmente classificados em: preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar objetiva apenas a remoção

de sólidos grosseiros, enquanto que o tratamento primário visa a remoção de sólidos sedimentáveis e, conseqüentemente, parte da matéria orgânica. Já no tratamento secundário o objetivo principal é a remoção de matéria orgânica carbonácea e, eventualmente, de nutrientes (nitrogênio e fósforo). O tratamento terciário objetiva a remoção de poluentes específicos ou a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos nos níveis anteriores (VON SPERLING, 2014). Metcalf e Eddy (2014) ainda classificam um nível avançado de tratamento de esgoto, com o propósito de remover materiais suspensos ou dissolvidos, que permanecem após o tratamento biológico, quando requerido para aplicação de reuso.

## 2.2 TECNOLOGIAS NORMATIZADAS PARA TRATAMENTO DE ESGOTO

Para o tratamento descentralizado de efluentes líquidos a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta duas normativas que vêm sendo utilizadas para o dimensionamento desses sistemas, quais sejam: (i) NBR 7229 (ABNT, 1993), que prescreve sobre o projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos (TS), destinados ao tratamento primário; e (ii) NBR 13969 (ABNT, 1997), que regulamenta algumas tecnologias de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos de TS.

As tecnologias de tratamento pós tanque séptico expostas na NBR 13969 (ABNT, 1997) são: filtro anaeróbio, filtro aeróbio submerso, filtro de areia, vala de filtração, lodo ativado por batelada e lagoa com plantas aquáticas. A Tabela 1 resume as principais informações sobre cada tecnologia normatizada.



Tabela 1 - Resumo das tecnologias apresentadas na NBR 13969 (ABNT, 1997) para tratamento de efluente líquido de tanque séptico. Continua.

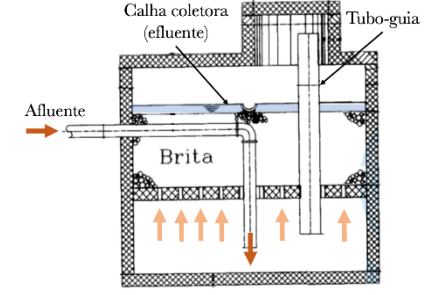
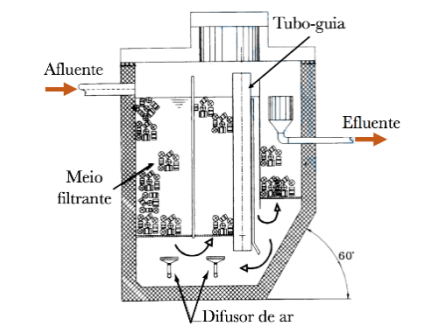
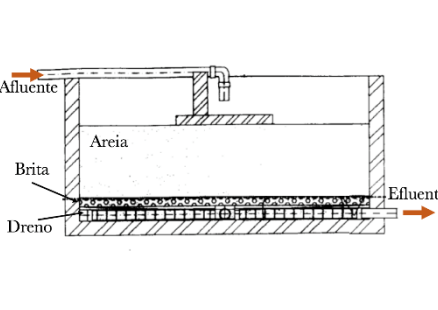
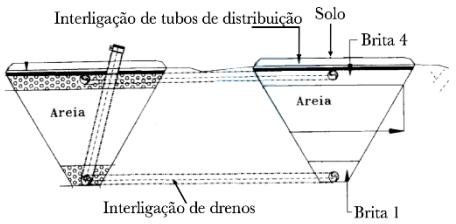
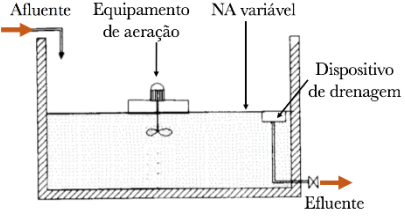
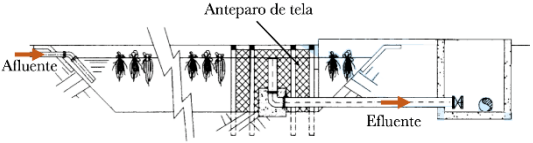
Tecnologia	Descrição	Principais características	Dimensionamento
<p>Filtro Anaeróbio</p> 	<p>Reator biológico composto por uma câmara inferior vazia e uma câmara superior preenchida com material filtrante submerso. O esgoto é depurado por microrganismos facultativos e anaeróbios, dispersos no espaço vazio do reator e nas superfícies do meio filtrante.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo operacional, simplicidade de operação, manutenção e área reduzida</li> <li>- Efluente pode exalar odor e ter cor escura</li> <li>- Material filtrante: brita ou outro material resistente com dimensões mais uniformes possíveis para evitar a obstrução</li> <li>- Necessária limpeza quando houver obstrução do leito filtrante</li> <li>- Eficiente na retenção de sólidos e redução de carga orgânica elevada;</li> </ul>	<p>Volume útil do leito filtrante (litros):  <math>V_u = 1,6 NCT</math></p> <p>Onde:  N = número de contribuintes  C = contribuição de despejo  T = tempo de detenção hidráulica</p>
<p>Filtro Aeróbio Submerso</p> 	<p>Reator biológico composto por câmara reatora com meio filtrante submerso e câmara de sedimentação, onde flocos biológicos sedimentam e retornam à câmara reatora por gravidade. O processo é basicamente aeróbio e o oxigênio é fornecido por equipamento. Grandes quantidades de microrganismos são fixados na superfície do meio, permitindo depuração em nível avançado, sem necessidade de recirculação de lodo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operação e manutenção simples, área reduzida e alto custo operacional</li> <li>- Aeração através de equipamentos de modo contínuo e ininterrupto</li> <li>- Em reator maior, é necessária uma bomba para retirada periódica do lodo, aumentando o intervalo de limpeza</li> <li>- Câmara de sedimentação com paredes de inclinação mínima de 60° para permitir deslizamento dos sólidos sedimentados e retorno para a câmara de reação</li> <li>- Eficiente na remoção de matéria orgânica e sólidos</li> <li>- Pode remover nutrientes se houver subdivisão da câmara de sedimentação, com alternância de fases anóxicas e aeróbias;</li> </ul>	<p>Volume útil (litros) da câmara de reação:  <math>V_{ur} = 400 + 0,25 NC</math></p> <p>Volume útil (litros) da câmara de sedimentação:  <math>V_{us} = 150 + 0,20 NC</math></p> <p>Onde:  N = número de contribuintes  C = contribuição de despejo</p>
<p>Filtro de Areia</p> 	<p>Tanque preenchido com areia e outros meios filtrantes, com fundo drenante e fluxo descendente. O esgoto é filtrado através do meio, onde se processa a depuração por meio físico (retenção) e bioquímico (oxidação), devido aos microrganismos fixos nas superfícies dos grãos de areia. O processo é basicamente aeróbio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplicidade de operação e manutenção</li> <li>- O sistema de filtração permite nível elevado de remoção de poluentes</li> <li>- Aplicação intermitente do efluente com bomba ou dispositivo dosador, para manter condições aeróbias no interior do filtro</li> <li>- Alternância no uso, para permitir a digestão do material retido no filtro. Devem ser previstas no mínimo 2 unidades, cada uma com capacidade total de filtração</li> <li>- Limpeza: raspagem e remoção do material depositado na superfície, juntamente com pequena camada de areia. Camada removida deve ser repostada com areia limpa</li> </ul>	<p>Taxa de aplicação superficial limitada a <b>100 L.d<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup></b>, considerando aplicação após tanque séptico.</p>

Tabela 1 - Resumo das tecnologias apresentadas na NBR 13969 (ABNT, 1997) para tratamento de efluente líquido de tanque séptico. Continuação.

Tecnologia	Descrição	Principais características	Dimensionamento
Vala de Filtração 	<p>Vala escavada no solo, preenchida com meios filtrantes e provida de tubos de distribuição de esgoto e de coleta de efluente filtrado, destinada à remoção de poluentes através de ações físicas e biológicas sob condições essencialmente aeróbias. Se diferencia do filtro de areia por não ter sua área superficial exposta ao tempo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo operacional e simplicidade de operação/manutenção</li> <li>- Material filtrante: areia e/ou pedregulho ou pedra britada.</li> <li>- Funcionamento intermitente, conforme filtro de areia, e com tubos de ventilação para garantir condições aeróbias.</li> <li>- Alternância no uso, para permitir digestão do material retido e desobstrução dos poros. Devem ser previstas 2 unidades, cada uma com capacidade total de filtração.</li> <li>- O sistema de filtração permite nível elevado de remoção de poluentes</li> </ul>	<p>Taxa de aplicação superficial limitada a <math>100 \text{ L.d}^{-1}.\text{m}^{-2}</math>, considerando aplicação após tanque séptico</p>
Lodo ativado por batelada 	<p>Processo de tratamento consiste na retenção de esgoto em um único tanque reator, onde se processa a remoção de poluentes, sedimentação dos sólidos e drenagem do efluente tratado, de modo cíclico. No processo há formação de flocos de microrganismos basicamente aeróbios, cujo oxigênio é fornecido por ar injetado com equipamentos. Os flocos são separados do líquido na fase de sedimentação, drenando-se o efluente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processo de tratamento compacto com operação simples, mas exige manutenção regular com intervalos menores do que outros processos</li> <li>- Alto custo operacional</li> <li>- Parte do lodo biológico gerado deve ser retirada periodicamente (lodo excedente).</li> <li>- Considerar um ciclo por dia e tempo de detenção hidráulica de 1 dia.</li> <li>- Introdução de ciclos alternados de fase aeróbia e fase de carência de oxigênio promove a remoção eficiente de N e P e reduz o consumo energético.</li> <li>- Vantajoso para locais com parâmetros de lançamento bastante restritivos.</li> </ul>	<p>Volume útil do reator: <math>V_{ur} = 2 NC</math></p> <p>Onde:            N = número de contribuintes            C = contribuição de despejo</p> <p>Volume de armazenamento do lodo deve ser igual ao volume diário de esgoto</p>
Lagoa com plantas aquáticas 	<p>Tratamento onde o esgoto é mantido em um tanque raso com plantas aquáticas flutuantes, cuja remoção de poluentes se dá através de plantas e microrganismos fixos nas raízes das mesmas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo operacional e simplicidade de operação e manutenção</li> <li>- Recomendada para locais com temperatura média anual inferior a <math>15^\circ\text{C}</math> ou que apresentem baixa incidência solar direta.</li> <li>- Remoção periódica das plantas, para manter a população controlada e manter o crescimento para remoção de nutrientes.</li> <li>- Plantas removidas podem ser utilizadas para produção de compostos orgânicos ou introduzidas no campo agrícola.</li> <li>- Boa remoção de carga orgânica e de nutrientes</li> </ul>	<p>Taxa de aplicação hidráulica superficial máxima de <math>600 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}</math></p>

## 2.3 WETLANDS CONSTRUÍDOS

Os wetlands construídos (WC), também conhecidos como filtros plantados com macrófitas, são sistemas de engenharia projetados para utilizar os processos naturais que envolvem a vegetação, o solo e suas populações microbianas associadas ao tratamento de águas residuárias. Tais sistemas são projetados para obter as vantagens dos processos que ocorrem em zonas úmidas (tradução literal do termo wetland) naturais, porém fazendo com que ocorram em um ambiente controlado (VYMAZAL, 2005; STEFANAKIS; AKRATOS; TSIHRINTZIS, 2014).

Os WC são módulos escavados ou construídos sobre o solo, impermeabilizados e preenchidos com material filtrante (normalmente areia ou brita) que dão suporte para o crescimento das macrófitas e do biofilme. No entanto, não somente esses componentes são responsáveis pela eficiência do sistema. Outros fatores como o regime operacional e condições climáticas, por exemplo, são fundamentais no desempenho dos WC (SEZERINO *et al.*, 2018).

O tratamento do efluente acontece através da depuração da matéria orgânica, transformação da série nitrogenada e retenção do fósforo. Para isso, ocorrem processos físicos – de filtração e sedimentação; químicos – através da adsorção na superfície do material filtrante; e biológicos – com a degradação microbiológica aeróbia e anaeróbia, predação e retirada de nutrientes pelas macrófitas (PHILIPPI; SEZERINO, 2004).

Os WC podem ser utilizados para fornecer algumas ou todas as funções do tratamento secundário ou superior (KADLEC; WALLACE, 2009; VYMAZAL, 2009), e podem ser projetados para atender desde uma única residência até cerca de 2.000 pessoas (COOPER *et al.*, 1996). No entanto, um pré-tratamento a nível primário é necessário antes da disposição do esgoto a ser tratado em um WC, com vistas a maximizar a eliminação de materiais sólidos grosseiros, e assim, evitar o entupimento do material filtrante (PHILIPPI; SEZERINO, 2004; KADLEC; WALLACE, 2009; DOTRO *et al.*, 2017). Os tanques sépticos, baseados no princípio de decantação e digestão do material decantado, são as alternativas mais empregadas no Brasil (PHILIPPI; SEZERINO, 2004).

### 2.3.1 Classificação dos wetlands construídos

Wetlands construídos podem ser projetados numa variedade de regime hidráulico a depender das características do efluente que se deseja tratar. No atual estágio de

desenvolvimento tecnológico, três tipos de wetlands construídos estão em uso generalizado: (i) de escoamento superficial com áreas alagadas, semelhante aos pântanos naturais; (ii) de escoamento subsuperficial horizontal, no qual o efluente é mantido abaixo da superfície filtrante e flui horizontalmente da entrada para a saída; e (iii) de escoamento subsuperficial vertical, no qual o efluente é tratado à medida que percola verticalmente no maciço filtrante (KADLEC; WALLACE, 2009). Essas três configurações ainda podem ser classificadas conforme a saturação do material filtrante, as formas de alimentação e os tipos de macrófitas, como apresentado na Figura 1. Nessa pesquisa será evidenciada a utilização dos WC de escoamento subsuperficial, desse modo, apenas as características dessa configuração serão abordadas na sequência.

#### 2.3.1.1 *Wetland Construído Horizontal (WCH)*

Nessa concepção, o efluente a ser tratado é disposto na porção inicial do leito, denominada zona de entrada, normalmente constituída de brita. A partir da zona de entrada o efluente irá percolar vagarosamente através do material filtrante, até atingir a porção final, também composta por brita e denominada zona de saída. Essa percolação tende a seguir na horizontal e é impulsionada por uma declividade de fundo, como exemplificado na Figura 2 (PHILIPPI; SEZERINO, 2004).

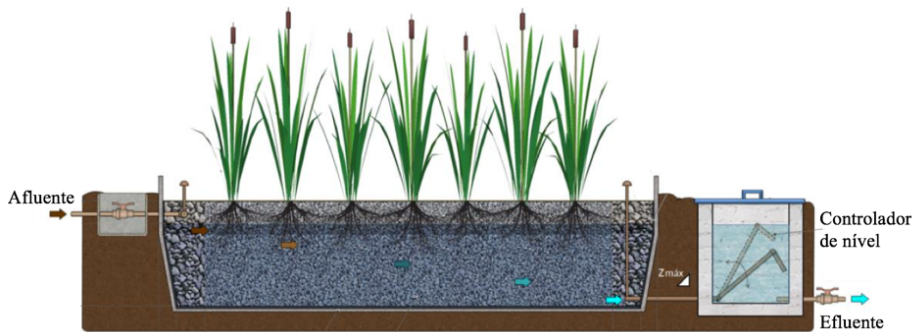
Durante a percolação, as águas residuais entram em contato com regiões aeróbias, anóxicas e anaeróbias. A zona aeróbia é mais evidente ao entorno das raízes das macrófitas, pois essas tendem a transportar oxigênio da parte aérea para as raízes e, sobretudo, ocorrem nessa porção do leito filtrante os fenômenos de convecção e difusão de oxigênio atmosférico. Assim, conseqüentemente, as zonas anóxicas e anaeróbias ocorrem em áreas mais afastadas das raízes das macrófitas (COOPER *et al.*, 1996; BRIX, 1997; VYMAZAL, 2005).

Apesar da existência de regiões aeróbias próximas as raízes nos WCH, na maior parte do tempo, o material filtrante e a rizosfera permanecem inundados com o efluente aplicado (em função de um controlador de nível na zona de saída), o que impede a entrada de oxigênio atmosférico no maciço filtrante, tornando o ambiente predominantemente anóxico e/ou anaeróbio (SEZERINO, 2006).

De modo geral, os WCH apresentam boa performance na remoção de matéria orgânica (sólidos suspensos totais – SST e demanda bioquímica de oxigênio – DBO<sub>5</sub>) e potencialidade de promover a desnitrificação em esgotos que contenham nitrato. Porém, não garantem bons



Figura 2 - Esquema do perfil longitudinal de um wetland construído horizontal.



Fonte: VON SPERLING e SEZERINO (2018).

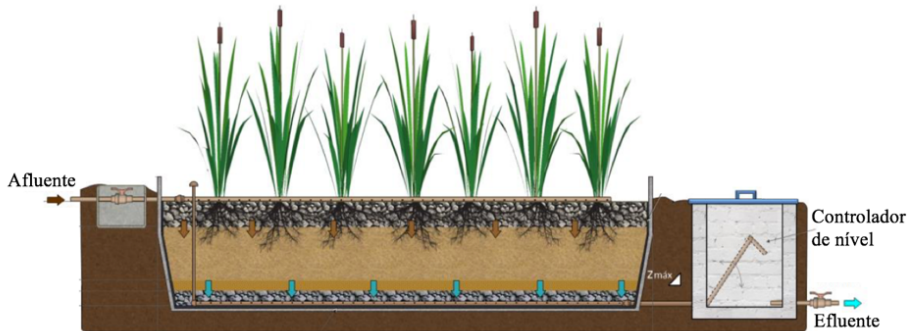
### 2.3.1.2 Wetland Construído Vertical (WCV)

Nessa modalidade de WC (Figura 3) a alimentação do esgoto afluente se dá de forma intermitente com períodos curtos, seguidos de intervalos longos de repouso, durante os quais a água residual percola no substrato verticalmente, sendo coletada no fundo por meio de tubulações de drenagem (COOPER *et al.*, 1996; IWA, 2000; KADLEC; WALLACE, 2009; HOFFMANN *et al.*, 2011).

Esse carregamento intermitente do esgoto sobre a área superficial do módulo de WCV promove um grande arraste de oxigênio atmosférico para o interior do material filtrante, através da convecção e difusão. Quando uma nova alimentação é realizada, nova quantidade de oxigênio é adicionada ao oxigênio já disposto na massa sólida (COOPER *et al.*, 1996), promovendo assim atividade de alta degradação aeróbica (HOFFMANN *et al.*, 2011). Por isso, de modo diferente do WCH, nos WCV é necessária a utilização de bombas ou outro dispositivo hidráulico que promova a alimentação intermitente em forma de pulsos (HOFFMANN *et al.*, 2011). Tal como acontece no WCH, as plantas transferem oxigênio para a rizosfera, mas é uma quantidade pequena em comparação com a transferência de oxigênio criada pela alimentação em pulsos (COOPER *et al.*, 1996).

O WCV é idealizado, principalmente, para promover a remoção da matéria orgânica, retenção de sólidos e a conversão do nitrogênio amoniacal a nitrato, produzindo um efluente nitrificado devido a predominância aeróbia no maciço filtrante (COOPER *et al.*, 1996; KADLEC; WALLACE, 2009).

Figura 3 - Esquema do perfil longitudinal de um wetland construído vertical descendente.



Fonte: VON SPERLING e SEZERINO (2018).

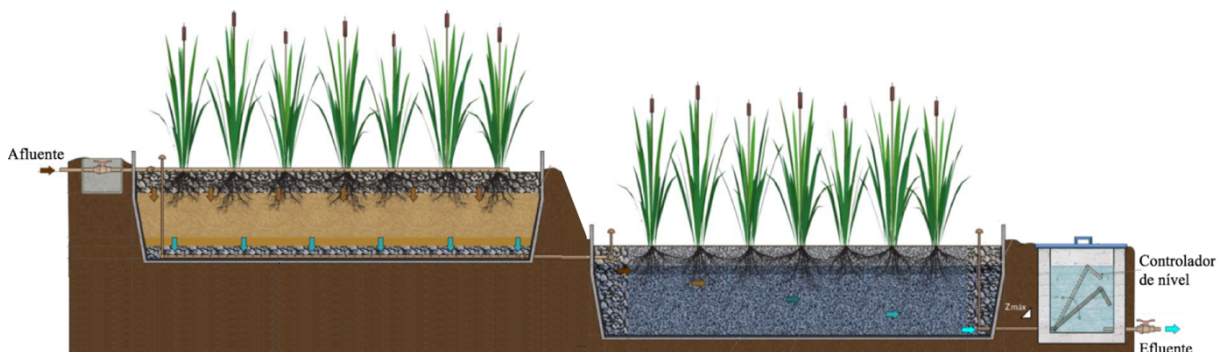
Nota: Controlador de nível é opcional e empregado somente para iniciar o processo de operação, sendo rebaixado na sequência para o sistema trabalhar com drenagem livre.

### 2.3.1.3 Sistema Híbrido

Várias configurações de wetlands construídos podem ser combinadas para obter maior eficiência de tratamento, sobretudo para o nitrogênio. Essa associação entre WC é denominada sistema híbrido. A associação mais frequente compreende os filtros plantados de fluxo vertical com os de fluxo horizontal (VYMAZAL, 2005).

Ao combinar esses dois sistemas na sequência do vertical para o horizontal, as vantagens de ambos são complementadas e, assim, é possível produzir efluentes com baixo teor de  $DBO_5$ , completamente nitrificados e parcialmente desnitrificados (COOPER, 1999; VYMAZAL, 2005; SEZERINO, 2006). Isso ocorre porque os WCV são mais empregados para se obter a nitrificação, em função da maior incorporação de oxigênio por convecção e difusão atmosférica no material filtrante. Já no WCH o processo de desnitrificação é mais evidente.

Figura 4 - Esquema do perfil longitudinal de um sistema híbrido.



Fonte: elaborado a partir de VON SPERLING e SEZERINO (2018).

## 2.4 ESCOLHA DA TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Hoje, devido aos avanços científicos e tecnológicos, existem uma diversidade de tecnologias para o tratamento de efluentes com diferentes custos de implantação, operação e manutenção, distinto requerimento de área e energia, diferentes quantidades de lodo produzido e atendendo a uma diversidade de outros requisitos necessários, de modo a se ajustar as condições locais.

No entanto, comumente, a escolha da tecnologia de tratamento carece de abordagens científicas que considerem a análise das relações entre os diferentes critérios que afetam a tomada de decisão e, assim, essa seleção acaba por considerar apenas alguns aspectos. A exemplo disso, Kalbar, Karmakar e Asolekar (2012) e Netto, Souza e Lopes Júnior (2001) indicam que em alguns lugares a seleção da tecnologia é direcionada principalmente para o cumprimento de padrões regulatórios e o custo da tecnologia, deixando de considerar outros critérios essenciais.

Chernicharo *et al.* (2018) apontam que o processo de seleção de uma tecnologia de tratamento para determinado cenário pode estar relacionado à orientação das companhias de saneamento ou às preferências regionais associadas ao conhecimento e à experiência dos projetistas. É notório que essa seleção preferencial nem sempre define a tecnologia mais adequada ao cenário em questão. A escolha errada pode levar a um desperdício de recursos a longo prazo e a má alocação de recursos financeiros limitados (KALBAR; KARMAKAR; ASOLEKAR, 2012).

Netto, Souza e Lopes Júnior (2001), sugerem que a escolha da tecnologia deve representar um ponto de convergência e harmonização de diferentes variáveis de múltiplas dimensões, constituindo um instrumento para se alcançar a melhor aplicabilidade das tecnologias desenvolvidas. Para Muga e Mihelcic (2008), em uma época em que há uma crescente preocupação com o impacto das estratégias de gestão ambiental e urgência de reduzir problemas de saneamento e doenças, há uma necessidade de desenvolver maior responsabilidade ambiental com tecnologias de tratamento de águas residuais mais apropriadas, cujo desempenho seja equilibrado pela sustentabilidade ambiental, econômica e social. Complementando, Balkema *et al.* (2002) descrevem o conceito de desenvolvimento sustentável baseado na observação de que a economia, o meio ambiente e o bem-estar não podem mais ser separados. Assim, para os autores, essas três dimensões devem ser consideradas na escolha da tecnologia sustentável.



No entanto, o processo de escolha torna-se uma atividade complexa ao se inserirem múltiplos critérios de análise na seleção de uma tecnologia de tratamento, sendo necessária a utilização de uma técnica abrangente, que integre todos esses critérios na decisão. As metodologias de multicritérios de tomada de decisão são alternativas potenciais para essa escolha.

## 2.5 MÉTODO MULTICRITÉRIO DE TOMADA DE DECISÃO

A tomada de decisão é extremamente intuitiva quando se consideram os problemas de critério único, uma vez que a alternativa escolhida é a de maior índice de preferência. No entanto, quando se avaliam alternativas com múltiplos critérios, o problema torna-se mais complicado e precisa ser superado por métodos mais sofisticados (TZENG; HUANG, 2011). Segundo Tzeng e Huang (2011) a mente humana possui restrição para avaliar as alternativas quando existem mais de três critérios de escolha. Por isso, a busca por métodos para tomar uma decisão ideal nunca foi abandonada por acadêmicos e praticantes. Esse propósito foi a motivação por trás do surgimento da tomada de decisão multicritério (MCDM).

A análise multicritério estuda formas de auxiliar o homem a tomar decisões na presença de incertezas e conflitos de interesses, permitindo que diversos critérios sejam levados em conta simultaneamente (BORRETO; COMINO; RIGGIO, 2011). Como em aplicações reais apenas uma solução é executada, surge um problema de decisão, qual seja: escolher entre as várias soluções eficientes aquela que é a mais satisfatória, considerando vários critérios (PARREIRAS, 2006). A exemplo disso, quando se trata de uma tecnologia para tratamento de efluentes, nem sempre é possível projetar um sistema que minimize o custo, uso de energia e a área da terra, maximizando o desempenho (BALKEMA *et al.*, 2002). Assim, para que haja a maior coerência possível entre a solução final e os interesses dos decisores, faz-se necessário o uso de técnicas de decisão multicritério (PARREIRAS, 2006).

Netto, Souza e Lopes Júnior (2001) sugerem que na avaliação da performance de unidade de tratamento de efluentes, a análise multicritério mostra-se bastante indicada, pois além de ser necessário atingir a vários objetivos (sanitários, ambientais, econômicos e financeiros), também envolve vários agentes decisores (como o prestador de serviço de saneamento e o órgão ambiental).

Gomes, Araya e Carignano (2004) acrescentam que os métodos MCDM têm um caráter científico e, ao mesmo tempo, subjetivo. Esses métodos trazem consigo a capacidade de

agregar todas as características consideradas importantes, inclusive as não quantitativas, com a finalidade de possibilitar a transparência e a sistematização do processo referente aos problemas de tomada de decisões.

É preciso aceitar que a subjetividade está sempre presente nos processos de decisão, pois para um decisor uma opção pode ser a melhor, no entanto, para outro, pode não ser. Costa (2002) complementa que uma das principais e mais atraentes características das metodologias de tomada de decisão com multicritérios é a capacidade de reconhecer a subjetividade como algo inerente aos problemas de decisão e, assim, utilizar julgamento de valor como forma de tratá-la cientificamente.

Em última análise, Benítez *et al.* (2012) classificam o problema de tomada de decisão como sendo discreto, ou seja, envolve a seleção de uma alternativa dentro de um conjunto finito de escolhas viáveis com base na avaliação de cada uma contra um determinado conjunto de critérios.

Muitas abordagens MCDM foram desenvolvidas para ajudar tomadores de decisão em diferentes ambientes. Dentre os métodos mais conhecidos estão (COSTA, 2002; GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004; FIGUEIRA; GREGO; EHRGOTT, 2005; PARREIRAS, 2006):

- Método de Análise Hierárquica (AHP, *Analytic Hierarchy Process*);
- Método de Análise em Rede (ANP, *Analytic Network Process*);
- ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*);
- PROMETHEE (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*);
- MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*);
- TODIM (Tomada de Decisão Interativa Multicritério);
- TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*);
- MAUT (*Multiple Attribute Utility Theory*).

Dentre essas metodologias MCDM destaca-se o método de análise hierárquica (AHP), proposto como uma ferramenta simples para solucionar problemas complexos de forma estruturada, possibilitando o reconhecimento e tratamento da subjetividade inerentes aos problemas de decisão (COSTA, 2002). Segundo Costa (2002), Gomes, Araya e Carignano (2004), Marins, Souza e Barros (2009) e Kalbar, Karmakar e Asolekar (2013), o AHP é um dos primeiros métodos para decisões de multicritério discreta, e um dos mais conhecidos e utilizados no mundo.

Ainda segundo Borreto, Comino e Riggio (2011) essa metodologia tem sido amplamente aceita pela comunidade científica internacional. Uma coleção abrangente da literatura envolvendo o AHP tem sido utilizada em diversas áreas como: gestão ambiental, transporte, construção, saúde, logística, finanças, gestão urbana, indústria de mineração e educação (SIPAHI; TIMOR, 2010).

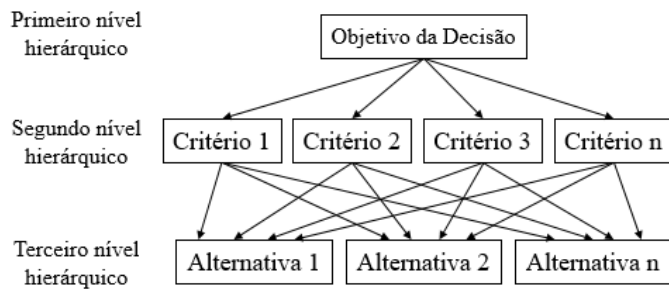
Especificamente na área de gestão ambiental, o AHP tem sido utilizado na avaliação da sustentabilidade de usinas de energia (CHATZIMOURATIDIS; PILAVACHI, 2008), na seleção do método de tratamento de efluentes (SRDJEVIC; SAMARDZIC; SRDJEVIC, 2012; MOLINOS-SENATE *et al.*, 2014 e NASUTION *et al.*, 2018), na análise do tratamento de resíduos (MILUTINOVIC *et al.*, 2014 e LEE; VACCARI; TUDOR, 2016), e na escolha dos potenciais usos e tecnologias para a reutilização de efluentes (CHEN; WU; YANG, 2014; PIADDEH; ALAVI-MOGHADDAM; MARDAN, 2018).

## 2.6 ANÁLISE HIERÁRQUICA DO PROCESSO (AHP)

O método de análise hierárquica (AHP), originalmente desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, objetiva a escolha de alternativas em um processo que considera diferentes critérios de avaliação. Esse método baseia-se em três princípios de pensamento analítico, quais sejam: (i) construção de hierarquia, (ii) definição de prioridades, (iii) consistência lógica (COSTA, 2002).

Segundo Saaty (1990), talvez a tarefa mais crítica para tomar uma decisão seja a escolha dos fatores que são importantes para essa decisão. Na aplicação do método AHP esses fatores são organizados em uma estrutura hierárquica que vai de uma meta geral a critérios, subcritérios e alternativas em níveis sucessivos. A existência dessa hierarquia de decisão é o aspecto principal do método (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004). Nessas estruturas, o objetivo principal do problema de decisão é colocado em um primeiro nível hierárquico. Nos níveis sucessivamente inferiores estão os critérios e subcritérios que apresentam algum impacto no critério do nível superior a ele. Por fim, no último nível da hierarquia estão representadas as alternativas consideradas para atingir o objetivo e que serão priorizadas com a aplicação do método AHP (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004; MARINS; LIMA, 2010). Na Figura 5 apresenta-se um exemplo genérico para essa estrutura hierárquica.

Figura 5 - Estrutura hierárquica genérica de problema de decisão.



Fonte: Elaborado com base em Saaty (1977).

Após a estruturação do problema em hierarquia, são definidas as prioridades de cada alternativa, através de uma comparação, par a par, de cada elemento de um mesmo nível hierárquico (MARINS; LIMA, 2010). Para isso, são utilizadas matrizes de comparação, e os valores de importância levam em consideração a preferência do decisor entre os elementos comparados sob o enfoque da relação que esses apresentam com o elemento do nível imediatamente superior. Em outras palavras, para um determinado objetivo central, as comparações são feitas entre pares de indicadores individuais, perguntando qual dos dois é o mais importante e quanto para aquele objetivo (OECD, 2008). Os valores de importância são atribuídos com base na escala fundamental proposta por Saaty (1977), apresentada na Tabela 2. Dessa forma, o juízo verbal de preferências dado as alternativas transformam-se em uma escala de valores numéricos (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

Tabela 2 - Escala fundamental de Saaty aplicada para obter os valores de importância pelo AHP.

<b>Intensidade de importância</b>	<b>Definição</b>	<b>Explicação</b>
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos números não-zero acima	Se uma atividade $i$ tem um dos números não-zero acima associados a ela quando comparada a uma atividade $j$ , então $j$ tem o valor recíproco quando comparado com $i$ .	

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Por fim, após as comparações e atribuições de valores de importância, calcula-se uma medida global (ou indicador composto) para cada uma das alternativas, classificando-as em prioridades. Segundo OECD (2004) “um indicador composto é formado quando os indicadores individuais são compilados em um único índice, com base em um modelo subjacente do conceito multidimensional que está sendo medido”.

Por considerar a preferência do decisor através das comparações, os métodos de tomada de decisão com multicritérios são considerados um tanto quanto subjetivos, como já mencionado. No entanto, é possível medir a consistência dos julgamentos realizados no AHP. Essa medida indica se a revisão de certos julgamentos é ou não necessária e, caso necessária, pode melhorar a confiabilidade do processo de avaliação. Gomes, Araya e Carignano (2004) ressaltam que é importante notar que a inconsistência em uma matriz de decisão deve servir mais como um fator de alerta para o decisor, do que um fator necessariamente não desejável. Ainda segundo OECD (2008), as crenças das pessoas nem sempre são consistentes e a inconsistência faz parte da natureza humana. A medição do grau de consistência torna os resultados aceitáveis para o público.

### 2.6.1 Vantagens e limitações do AHP

Para Schmidt (1995) as duas grandes vantagens que o AHP tem sobre outros métodos multicritérios, são a facilidade de uso e a habilidade de manusear com julgamentos inconsistentes. Além disso, entre as vantagens apresentadas pelo criador do método, destaca-se a possibilidade de descrever como as mudanças em prioridades nos níveis mais altos afetam a prioridade dos níveis mais baixos, através da representação hierárquica (SAATY, 1990). A OECD (2008) também cita a facilidade de assegurar que os aspectos qualitativos e quantitativos de um problema sejam incorporados ao processo de avaliação. Subramaniam e Ramanathan (2012), a partir de uma revisão da literatura, apontaram que um número significativo de aplicações com o AHP é encontrado quando os problemas de decisão exigem considerações de fatores qualitativos e quantitativos.

Em contrapartida, a maior limitação encontrada com o uso do AHP é a necessidade de um grande número de julgamentos para determinar todos os pares de comparação (MARINS e LIMA, 2010). Aumentando o número de alternativas, aumenta sensivelmente o trabalho computacional (SCHMIDT, 1995). Não há uma concordância entre os autores ou uma limitação do número de alternativas ideal pelo método AHP. Para Kalbar, Karmakar e Asolekar (2012) o número máximo de alternativas deve ser mantido para menos de sete para alcançar consistência nas preferências. Gomes, Araya e Carignano (2004) explicam que essa restrição é embasada em estudos de psicometria que demonstram a existência de limitações do cérebro humano para comparar, ao mesmo tempo, mais de sete coisas. Ainda segundo os autores, mesmo que o método de decisão multicritério permita, não é aconselhável trabalhar, simultaneamente, com mais de 20 atributos em um mesmo nível de igualdade.

Além disso, Marins e Lima (2010) citam que a inversão na ordem de prioridade com a exclusão ou inclusão de alternativas ou critérios é também um tema recorrente entre os críticos do AHP.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Dado um conjunto de alternativas tecnológicas passíveis de serem empregadas para o tratamento descentralizado de águas residuais, o problema consiste na escolha da alternativa mais adequada sob o ponto de vista sustentável, que envolve a análise do viés econômico, ambiental e social. Ainda existem diversos outros critérios que devem ser levados em consideração para representar cada uma dessas vertentes. Por isso, a tomada de decisão baseada em um número finito de alternativas e critérios é considerada um tanto quanto complexa.

Neste trabalho, foi proposto o emprego do Método de Análise Hierárquica (AHP) no tratamento desse problema de tomada de decisão com múltiplos critérios. Na sequência, está apresentada a forma como esse método pode ser utilizado para a seleção da tecnologia mais adequada ao tratamento de esgoto, diante de um cenário proposto. Também estão apresentados os critérios utilizados para avaliar cada tecnologia e como deu-se a coleta dos dados.

Particularmente, o AHP foi escolhido, em primeiro lugar, devido à sua ampla aplicação em problemas de tomada de decisão; e em segundo lugar, por considerar simultaneamente elementos tangíveis e intangíveis na avaliação, através do uso de dados reais e de decisões subjetivas dos tomadores de decisão, bem como pela possibilidade de medir a consistência dos julgamentos realizados por estes.

O resultado desta análise comparativa dos sistemas é um indicador composto para cada uma das tecnologias selecionadas e avaliadas. Nesse contexto, o presente estudo contribui para facilitar o acesso das partes interessadas e tomadores de decisão a uma interpretação de um problema de decisão complexo e multidimensional, como a seleção das tecnologias mais sustentáveis dentro de um amplo conjunto de possibilidades.

#### 3.1 TECNOLOGIAS AVALIADAS

Para o desenvolvimento deste estudo foram analisadas cinco tecnologias de tratamento empregadas a nível secundário e/ou superior, frequentemente utilizadas para o tratamento descentralizado de esgoto em pequenas comunidades. Dessas, duas são tecnologias normatizadas, sendo elas: filtro anaeróbio (FAN) e lodo ativado por batelada (LAB). As demais correspondem a diferentes modalidades de wetlands construídos (WC), quais foram: de fluxo vertical (WCV), de fluxo horizontal (WCH) e a combinação do fluxo vertical com horizontal, formando o sistema híbrido (SH).

A principal razão para limitar este estudo a cinco tecnologias de tratamento é a limitação do método AHP quanto ao grande número de julgamentos.

### 3.2 INDICADORES PARA AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A definição de indicadores de sustentabilidade é um passo importante, pois a seleção de soluções sustentáveis é baseada nesses indicadores (BALKEMA *et al.*, 2002). A tecnologia de tratamento de esgoto definida como a mais adequada foi selecionada a partir da avaliação das três dimensões da sustentabilidade, quais foram: econômica, ambiental e social. Para tornar a análise mais detalhada e real, essas dimensões foram decompostas em outros indicadores que as representassem, por exemplo: a eficiência de tratamento pode ser um critério representante da dimensão ambiental, enquanto o custo de construção caracteriza a variável econômica.

Após a definição dos indicadores de cada dimensão, foram coletadas as informações que quantificam ou qualificam esses critérios (de eficiência e custo de construção, por exemplo) para cada uma das tecnologias avaliadas, para então ser possível compará-las. A obtenção dessas informações foi realizada por meio de coleta de dados, que podem ser dados primários (quando desenvolvidos ou coletados em campo de estações de tratamento) ou dados secundários (coletados da literatura). Vale ressaltar que os critérios podem ser de natureza quantitativa ou qualitativa.

Para padronizar a busca por informações e a comparação entre as alternativas, em todos os casos considerou-se como população de projeto 150 habitantes de residência de padrão médio, que equivale a produção de esgoto de 130 L.d<sup>-1</sup> por pessoa e a contribuição de carga orgânica de 45 gDBO.d<sup>-1</sup>, conforme ABNT (1997).

#### 3.2.1 Indicadores econômicos

Os indicadores econômicos são frequentemente decisivos na escolha de uma tecnologia em uma situação prática (BALKEMA *et al.*, 2002). Nesta pesquisa, foram selecionados para representar a dimensão econômica os seguintes critérios: custo de construção (CAPEX, do inglês *capital expenditure*) e custo de operação e manutenção (OPEX, do inglês *operational expenditure*) das tecnologias. Segundo Balkema *et al.* (2002) esses são os indicadores comumente utilizados para a dimensão econômica.



Os custos de construção foram obtidos a partir do dimensionamento das tecnologias de tratamento e, posteriormente, o levantamento de materiais, equipamentos, maquinários e serviços necessários para a construção. O dimensionamento das tecnologias normatizadas avaliadas nesse trabalho seguiu as recomendações da NBR 13969/97 (ABNT, 1997). Já os módulos de WC foram projetados a partir da aplicação de critérios de dimensionamento adquiridos pela experiência acumulada de mais de 15 anos de estudos com sistemas wetlands pelo grupo GESAD. Alguns desses critérios de dimensionamento, incluindo também condições operacionais, foram publicados em uma edição especial do Boletim Wetlands Brasil (VON SPERLING; SEZERINO, 2018).

Já os custos de operação e manutenção foram compostos pelas despesas com energia requerida, remoção do lodo produzido, necessidade de operador para o sistema e conserto de equipamentos. Assim, para compor esses custos foram coletados dados secundários da NBR 13969/97 (ABNT, 1997) e da literatura para as tecnologias normatizadas, enquanto para os WC esses dados tiveram como referência a experiência acumulada com estações de wetlands operadas e estudadas pelo GESAD e também dados da literatura.

Ressalta-se ainda que, quando os custos de construção, operação e manutenção de diferentes tecnologias são comparados, é essencial levar em consideração a vida útil de cada sistema (MOLINOS-SENATE *et al.*, 2014). Para LAB, em função dos equipamentos mecânicos, pode-se considerar como vida útil o período de 15 a 20 anos (VAN HAANDLE; VAN DER LUBBE, 2012). Em sistemas de WC, Cooper *et al.* (1996) sugerem a vida útil em 15 anos; já para Wallace e Knight (2006) sistemas bem gerenciados podem durar 20 anos ou mais, embora a vida útil média seja muito menor, entre 7 e 10 anos, devido à falta de operação adequada. Rouso (2014) avaliou o desempenho de um WCH a partir de dados coletados ao longo de 20 anos e identificou valores satisfatórios de remoção de matéria orgânica e nutrientes. Hoffmann *et al.* (2011) e Brix, Schierup e Arias (2007) também citam bons resultados no tratamento mesmo após 2 décadas de operação. Dessa forma, para este estudo considerou-se como vida útil para todos os sistemas analisados um período de 15 anos.

Para quantificar os custos despendidos com a construção, operação e manutenção utilizou-se o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), com valores referentes ao mês de julho de 2019, e quando os itens não constavam nesse documento, orçamentos em fornecedores de materiais ou empresas prestadoras de serviços foram realizados. O SINAPI efetua pesquisas de custos e índices da construção civil, a partir do levantamento de preços de materiais e salários pagos na construção civil, para o setor de

habitação. A origem desses dados são os fornecedores de materiais de construção civil e empresas construtoras do setor. O sistema é produzido através de um convênio com a Caixa Econômica Federal (IBGE, 2019).

É importante destacar que o SINAPI apresenta valores para insumos (valor individual para cada elemento, seja ele material, equipamento ou mão de obra) e para composições (que corresponde ao valor unitário considerando todos os itens necessários para um determinado serviço). Nesse estudo, em alguns casos, foram utilizados os preços de composições do SINAPI para obter uma melhor aproximação do valor real.

### **3.2.2 Indicadores ambientais**

Os indicadores ambientais referem-se à eficiência ambiental da tecnologia de tratamento em termos de qualidade do efluente, recursos utilizados e resíduos gerados e emitidos (MOLINOS-SENATE *et al.*, 2014). Apesar de diferentes literaturas apresentarem diferentes indicadores para representar a dimensão ambiental, Balkema *et al.* (2002) apontam energia, área necessária, qualidade do efluente e lodo como indicadores ambientais. Deve-se notar que entre as tecnologias em estudo algumas são intensivas e outras extensivas, por isso, a necessidade de área exigida para o tratamento difere consideravelmente entre elas.

Assim, foram propostos como indicadores ambientais a eficiência de remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos totais e de nutrientes, a área necessária para implantação, a energia requerida e a quantidade de lodo removido do sistema. Nota-se que a produção de lodo e energia requerida foram incluídas duas vezes na avaliação, porém em dimensões diferentes (ambiental e econômica). Entende-se isso como algo necessário, uma vez que ambos os critérios são indispensáveis para o levantamento de custo das tecnologias, por serem inerentes à operação do tratamento; bem como para a questão ambiental, já que são representantes nos impactos ambientais gerados. Ademais, vale ressaltar que os pesos atribuídos aos indicadores e dimensões podem ser diferentes.

Para as tecnologias de tratamento normatizadas, a NBR 13969/97 (ABNT, 1997) apresenta algumas faixas prováveis de eficiência de remoção de poluentes, considerando o conjunto com o tanque séptico. Além da norma, outros trabalhos da literatura foram utilizados para embasar os valores de eficiência de remoção adotados para cada parâmetro e cada tecnologia normatizada. De forma semelhante, para definir a eficiência de remoção nos WC foram utilizados como referências principais Von Sperling e Sezerino (2018) e dados primários

da estação experimental de wetlands construídos do GESAD. Além disso, outras referências da literatura também foram consultadas para embasar esses valores para os WC.

É importante ressaltar que a estação experimental de wetlands construídos do GESAD é uma unidade piloto construída em escala real, e opera de forma contínua desde sua construção em junho de 2015. As eficiências de remoções são analisadas quinzenalmente desde o início da operação da estação. Por isso, em razão da longa série amostral e da adequada operação do sistema por ser uma unidade experimental, os dados gerados por essa fonte são considerados como uma referência confiável.

Da mesma forma, a energia requerida e o lodo removido dos sistemas foram obtidos com base na literatura e, em alguns casos, através de experiências obtidas na estação experimental do GESAD. A área necessária para a implantação das tecnologias foi definida com base no dimensionamento.

### **3.2.3 Indicadores sociais**

Os critérios sociais representam o impacto que a tecnologia de tratamento apresenta sobre a sociedade. No entanto, por serem, em sua maioria, de natureza qualitativa ou difíceis de quantificar, muitas vezes não são abordados na avaliação de sustentabilidade. Procedimento esse contestável, tendo em vista que esses indicadores representam um papel importante na implementação da tecnologia (BALKEMA *et al.*, 2002).

Neste estudo os indicadores sociais foram adotados tomando como base fatores que podem afetar a aceitação dos usuários sobre determinada tecnologia. Nesse caso, os critérios abordados como sociais foram: (1) características gerais da tecnologia de tratamento e efluente final (analisada em função do odor e cor no efluente final, do ruído produzido, do impacto visual gerado, da possibilidade de atrair animais e vetores, do potencial de aproveitamento dos subprodutos e da resiliência para absorver variações de cargas) e (2) complexidade de construção e operação. Para Molinos-Senate *et al.* (2014) a simplicidade pode ser um fator chave na seleção do sistema de tratamento, especialmente nas regiões em desenvolvimento. Tais indicadores sociais foram obtidos a partir de uma extensa revisão da literatura.

Apesar de ser possível medir o odor e o ruído, esses foram abordados, assim como os demais critérios sociais, como sendo de natureza qualitativa. Isso porque no âmbito das tecnologias de tratamento, ainda são poucas as informações quantitativas sobre esses critérios (MOLINOS-SENATE *et al.*, 2014). Para Balkema *et al.* (2002) apesar de alguns critérios serem

difíceis de quantificar, para assegurar o caráter integrado e multidimensional da avaliação de sustentabilidade, é melhor incluí-los qualitativamente, em vez de nada.

### **3.2.4 Conjunto de critérios de sustentabilidade para escolha da alternativa tecnológica**

Na Tabela 3 apresentam-se as três dimensões da sustentabilidade e os dez critérios definidos para este estudo, bem como a classificação da natureza (qualitativa ou quantitativa), da unidade de representação dos parâmetros quantitativos e da fonte de informação (dados primários e/ou secundários) de cada indicador.

Ressalta-se que os critérios de natureza qualitativa foram abordados com base em uma escala conceitual de classificação (por exemplo: com as opções de alto, médio ou baixo). Os critérios qualitativos de cada alternativa foram assim classificados com base nas informações coletadas a partir dos dados primários ou secundários.

Tabela 3 - Conjunto de indicadores de sustentabilidade para escolha da alternativa tecnológica.

Dimensão	Indicador/Abreviação	Natureza/Unidade	Fonte da informação
Econômica	Custo de construção (CAPEX)	Quantitativo/ R\$.hab <sup>-1</sup>	Dimensionamento das tecnologias com base em Von Sperling e Sezerino (2018) para os WC e ABNT (1997) para tecnologias normatizadas. E dados do SINAPI e fornecedores de materiais ou serviços.
	Custo de operação e manutenção (OPEX)	Quantitativo/ R\$.hab <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Dados primários e secundários para os WC e secundários para tecnologias normatizadas. Dados do SINAPI e fornecedores de materiais ou serviços.
Ambiental	Eficiência de remoção de matéria orgânica (EMO)	Quantitativo/ % de remoção	Dados primários e secundários para os WCV e sistema híbrido e secundários para as tecnologias normatizadas e WCH.
	Eficiência de remoção de sólidos suspensos (ESS)	Quantitativo/ % de remoção	
	Eficiência de remoção de nutriente (EN)	Quantitativo/ % de remoção	
	Área requerida (AR)	Quantitativo/ m <sup>2</sup> .hab <sup>-1</sup>	Dimensionamento das tecnologias com base em Von Sperling e Sezerino (2018) para os WC e ABNT (1997) para tecnologias normatizadas.
	Energia requerida (ER)	Quantitativo/ kWh.m <sup>-3</sup> efluente tratado	Cálculo do consumo energético a partir da potência dos equipamentos e tarifa da CELESC.
	Produção de lodo (LP)	Quantitativo/ m <sup>3</sup> de lodo.m <sup>-3</sup> efluente tratado	Dados primários para os WC e secundários para as tecnologias normatizadas.
Social	Característica do tratamento e efluente final (CTE)	Qualitativo	Dados primários e secundários para os WC e secundários para as tecnologias normatizadas.
	Complexidade de construção e operação (CCO)	Qualitativo	Dados primários e secundários para os WC e secundários para as tecnologias normatizadas.

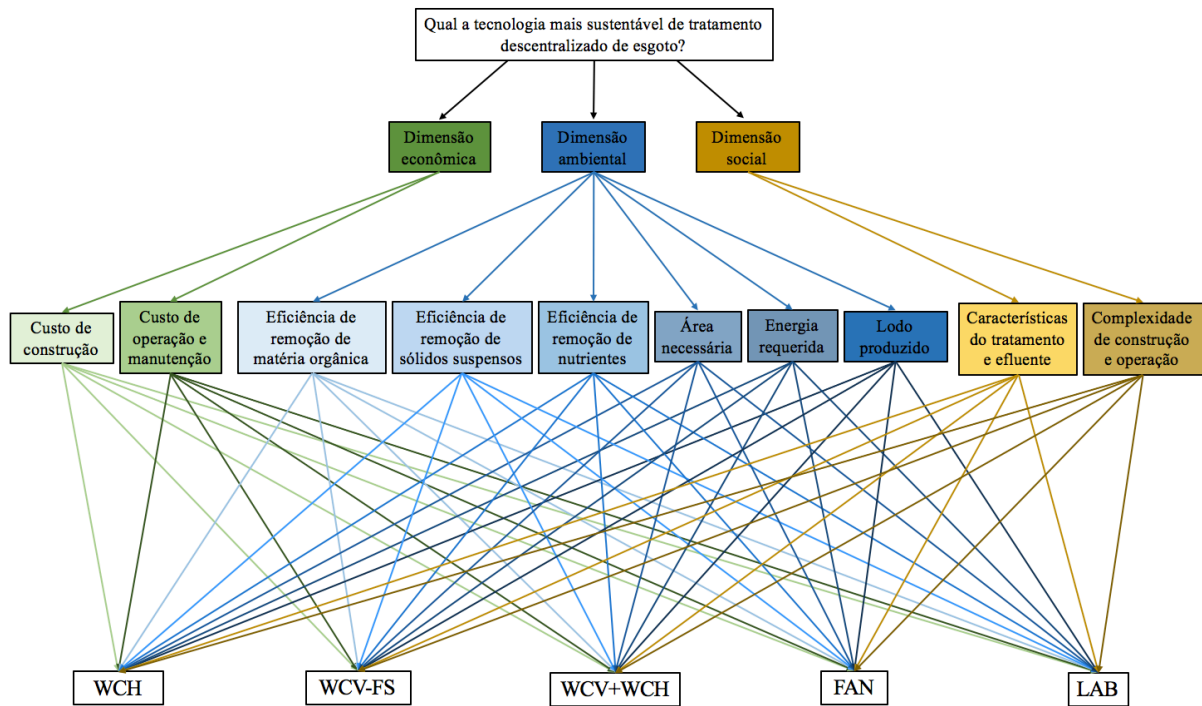
### 3.3 PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO

#### 3.3.1 Estrutura hierárquica do problema

Para a análise comparativa das tecnologias de tratamento pelo método AHP, o passo inicial é a construção de uma hierarquia. Para isso, é necessário definir: (i) o objetivo principal do problema de decisão, correspondente ao nível hierárquico superior; (ii) os critérios que influenciam esse objetivo, posicionados em um nível inferior; (iii) os subcritérios, que por sua vez, apresentam-se em um nível inferior aos critérios; e (iv) as alternativas disponíveis de escolha, elencadas em um último nível hierárquico. Esses elementos definem a estrutura hierárquica que é apresentada na Figura 6. Como pode-se observar, o objetivo principal é a definição da tecnologia mais sustentável ao tratamento descentralizado de esgoto; os critérios são representados pelas três dimensões de sustentabilidade: econômica, ambiental e social; os

subcritérios, pelos dez indicadores de sustentabilidade; e as alternativas, pelas cinco tecnologias de tratamento de esgoto.

Figura 6 - Estrutura hierárquica do problema de decisão "escolha da tecnologia de tratamento descentralizado de esgoto mais adequada", pela abordagem do método AHP.



### 3.3.2 Comparação entre elementos e atribuições de valores de importância

A etapa seguinte consiste na comparação, par a par, de cada um dos elementos de um mesmo nível hierárquico. Assim, primeiramente foram comparados os critérios elencados no segundo nível da estrutura hierárquica. Na sequência, a comparação foi realizada entre os subcritérios presentes no terceiro nível e, finalmente, foi realizada a comparação entre cada alternativa tecnológica, listada no último nível.

Ressalta-se que cada comparação de um mesmo nível hierárquico é realizada sob o enfoque da relação que esses apresentam com o elemento do nível imediatamente superior. Por exemplo, quando se realiza a comparação entre os subcritérios de custo de construção e custos de operação e manutenção, a preferência é definida com base na relevância que esses elementos apresentam sobre o indicador econômico.

A partir dessas comparações são atribuídos valores de importância para cada relação entre os critérios, subcritério e alternativas. Como já mencionado na revisão bibliográfica, esses valores são determinados com base na escala fundamental proposta por Saaty (1977), apresentada na Tabela 2. Assim, se o decisor julgar que o custo de construção tem igual importância que o custo de operação e manutenção, em relação ao indicador econômico, será atribuído um valor de importância 1 a essa comparação.

### 3.3.3 Matriz de julgamentos

A partir da comparação dos elementos pelos julgamentos do decisor, transformados em valores numéricos pela escala fundamental, se obtém um quadro de comparações, que pode ser disposto em uma matriz quadrada de decisão, também conhecida como matriz de julgamentos. Na Tabela 4 representa-se, genericamente, essa matriz com  $n$  alternativas ( $a_1, a_2, a_n$ ) à luz do critério  $C1$ , na qual  $x_{ij}$  corresponde ao valor numérico de importância atribuído pela comparação paritária das alternativas, variando  $i$  e  $j$  de 1 a  $n$ .

Tabela 4 - Matriz de decisão.

<b>C1</b>	<b>a1</b>	<b>a2</b>	...	<b>an</b>
<b>a1</b>	$X_{11}$	$X_{12}$	...	$X_{1n}$
<b>a2</b>	$1/X_{21}$	$X_{22}$	...	$X_{2n}$
...	...	...	...	...
<b>an</b>	$1/X_{n1}$	$1/X_{n2}$	...	$X_{nn}$

Ressalta-se que as matrizes de decisão do AHP são sempre matrizes recíprocas (COSTA, 2002; GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004), ou seja, se  $x_{12}$  possui valor de importância 2 (representando que o elemento 1 possui pequena importância sobre o elemento 2, pela escala fundamental de Saaty), então  $x_{21}$  irá possuir valor de importância de  $1/2$ .

Destaca-se também que nesse tipo de matriz, a diagonal principal é preenchida por valores que representem a não dominância de uma alternativa sobre outra (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004), uma vez que estão sendo comparados os mesmos elementos, ou seja, apresentam igual importância. Dessa forma, considerando a matriz apresentada na Tabela 4, os elementos  $x_{11}$ ,  $x_{22}$  e  $x_{nn}$  possuem valor 1.

Após a obtenção da matriz quadrada de comparação, é necessário normalizar essa matriz. Para isso, primeiramente calcula-se o somatório dos valores de importância de cada coluna da matriz; na sequência divide-se cada valor de importância ( $x_{ij}$ ) pelo somatório

referente à respectiva coluna (COSTA, 2002). Essa etapa de normalização é obtida através da Equação 1 (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

$$\bar{v}_i(A_j) = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

Onde:  $\bar{v}_i(A_j)$  é o elemento normalizado para cada  $x_{ij}$ ;  $x_{ij}$  é o valor de importância, obtido na comparação par a par do elemento da linha  $i$  com o elemento da coluna  $j$ ;  $n$  corresponde ao número de elementos comparados.

### 3.3.4 Vetor prioridade local

A etapa seguinte à normalização é a obtenção do vetor prioridade local, que corresponde à contribuição relativa de cada elemento em relação ao nível hierárquico imediatamente superior. Assim, se na comparação de três subcritérios, sendo eles S1, S2 e S3, julgados à luz do critério C1, forem obtidos os valores de prioridade de 0,22; 0,67 e 0,11, respectivamente, isso significa que o subcritério S2 possui maior influência sobre o critério C1, seguido do subcritério S1 e por último do subcritério S3.

O vetor prioridade local, obtido para cada elemento comparado, é calculado a partir da média aritmética dos valores de cada linha da matriz normalizada, conforme Equação 2 (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004). O vetor prioridade local também é chamado de autovetor da matriz e a somatória de seus elementos deve ser igual a 1.

$$\bar{v}_k(A_i) = \sum_{j=1}^n \frac{\bar{v}_i(A_j)}{n}, \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Onde:  $\bar{v}_k(A_i)$  é o vetor de prioridade local;  $\bar{v}_i(A_j)$  é o elemento normalizado para cada  $x_{ij}$ ;  $n$  é o número de elementos comparados.

### 3.3.5 Vetor prioridade global

O último passo do método AHP consiste na obtenção do vetor de prioridade global para cada alternativa, também conhecido como indicador composto ou medida global. Esse valor corresponde à prioridade associada a cada alternativa em relação ao objetivo principal do

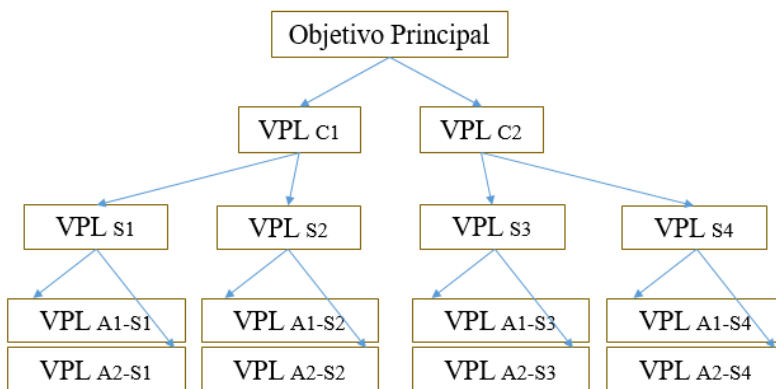


problema, ou seja, classifica as alternativas em prioridades. É a partir dele que é possível selecionar qual das alternativas é a mais adequada, considerando os indicadores ambientais, sociais e econômicos.

O vetor prioridade global é determinado pela agregação dos vetores prioridades locais, seguindo o caminho do topo da hierarquia até cada alternativa no nível mais baixo (BORRETO; COMINO; RIGGIO, 2011). Em outras palavras, o vetor prioridade global é obtido pelo somatório dos produtos do vetor de prioridade local (VPL ou  $\overline{v}_k(A_i)$ ) de uma alternativa à luz de um subcritério pelo VPL desse subcritério à luz do critério, e pelo VPL desse critério à luz do objetivo principal. Esse procedimento deve ser realizado de modo a englobar todos os vetores de prioridades locais que influenciam em determinada alternativa.

Na Figura 7 apresenta-se um exemplo genérico de uma estrutura hierárquica com dois critérios, quatro subcritérios e duas alternativas para exemplificar o cálculo do vetor prioridade global (VPG), determinado, nesse caso, por meio das Equações 3 e 4, para a alternativa 1 e 2, respectivamente.

Figura 7 - Exemplo de estrutura hierárquica genérica para cálculo de vetor prioridade global.



**LEGENDA:**

VPL = vetor prioridade local; n = número de elementos; Cn = critério; Sn = subcritério; An = alternativa; VPL A1-S1 = vetor prioridade local da alternativa 1 à luz do subcritério 1

$$VGP_{A1} = (VPL_{A1-S1} \cdot VPL_{S1} \cdot VPL_{C1}) + (VPL_{A1-S2} \cdot VPL_{S2} \cdot VPL_{C1}) + (VPL_{A1-S3} \cdot VPL_{S3} \cdot VPL_{C2}) + (VPL_{A1-S4} \cdot VPL_{S4} \cdot VPL_{C2}) \quad (3)$$

Onde:  $VPG_{A1}$  é o vetor prioridade global da alternativa 1; n é o número de elementos;  $VPL_{A1-Sn}$  é o vetor prioridade local da alternativa 1 com base no subcritério n;  $VPL_{Sn}$  é o vetor prioridade local do subcritério n;  $VPL_{Cn}$  é o vetor prioridade local do critério n.

$$VGP_{A2} = (VPL_{A2-S1} \cdot VPL_{S1} \cdot VPL_{C1}) + (VPL_{A2-S2} \cdot VPL_{S2} \cdot VPL_{C1}) + \\ (VPL_{A2-S3} \cdot VPL_{S3} \cdot VPL_{C2}) + (VPL_{A2-S4} \cdot VPL_{S4} \cdot VPL_{C2}) \quad (4)$$

Onde:  $VPG_{A2}$  é o vetor prioridade global da alternativa 2;  $n$  é o número de elementos;  $VPL_{A2-Sn}$  é o vetor prioridade local da alternativa 2 com base no subcritério  $n$ ;  $VPL_{Sn}$  é o vetor prioridade local do subcritério  $n$ ;  $VPL_{Cn}$  é o vetor prioridade local do critério  $n$ .

### 3.3.6 Medida de consistência

A grande quantidade de comparações entre elementos nos métodos de tomada de decisão com múltiplos critérios pode causar uma certa inconsistência de julgamentos. Segundo Costa (2002), mesmo quando os julgamentos são fundamentados na experiência e conhecimento de profissionais, essas inconsistências podem ocorrer. No entanto, é possível medir a consistência dos julgamentos realizados.

Considerando  $n$  o número de elementos a serem comparados e  $\lambda_{\max}$  o autovetor máximo da matriz, os juízos emitidos pelo decisor são considerados perfeitamente consistentes se  $\lambda_{\max} = n$ . O autovetor máximo ( $\lambda_{\max}$ ) é obtido por meio da multiplicação do autovetor direto (ou autovetor de prioridades, calculado por meio da Equação 2) pela matriz original. Esse cálculo oferece como resultado um novo vetor ( $Aw$ ), em que cada elemento é dividido pelo elemento correspondente no autovetor de prioridades, e os resultados são somados, calculando-se, em seguida a média aritmética, como mostra a Equação 5 (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]_i}{w_i} \quad (5)$$

Onde:  $\lambda_{\max}$  é o máximo autovetor da matriz de comparação;  $n$  é a ordem da matriz ou também o número de elementos a serem comparados,  $Aw$  é um autovetor obtido pela multiplicação do autovetor de prioridades pela matriz original;  $w$  é o elemento correspondente no autovetor de prioridades.

No entanto, é comum verificar certa inconsistência e obter  $\lambda_{\max} \neq n$ , fato esse admitido pelo AHP. Por isso, a forma de mensurar o grau de consistência de uma matriz de julgamentos paritários é avaliar o quanto o máximo autovetor da matriz se afasta da ordem dessa mesma matriz. Assim, a Razão de Consistência (RC) de uma matriz pode ser calculada por meio da Equação 6 (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004). O cálculo de RC também considera um erro aleatório associado a ordem da matriz, dado pelo Índice de Coerência Aleatória ou Índice Randômico (RI, do inglês *Random Consistency Index*) (MARINS; LIMA, 2010). Os valores de RI variam conforme a ordem da matriz e podem ser observados na Tabela 5.

$$RC = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1) RI} \quad (6)$$

Onde: RC é a razão de consistência;  $\lambda_{\max}$  é o máximo autovetor da matriz de comparação; n é a ordem da matriz ou também o número de elementos a serem comparados e RI é o Índice de Coerência Aleatória.

Tabela 5 - Índice de Coerência Aleatória (RI).

n	RI
2	0
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49

Fonte: Saaty (1980) apud CAVASSIN (2004).

Nota-se que para matrizes de ordem 2 o RI é nulo e, conseqüentemente, o RC é zero. Isso significa que quando houver apenas dois elementos a serem comparados em um mesmo nível hierárquico, não há necessidade de calcular a medida de inconsistência, uma vez que o julgamento sempre será consistente.

Quanto maior for o RC maior será a inconsistência. Por isso, Marins e Lima (2010) sugerem que para que uma determinada matriz de comparação seja considerada consistente, pelo método do AHP, o RC calculado deve ser menor ou igual a 0,10 (isto é, 90% consistente ou 10% inconsistente). Já a OECD (2008) ressalta que 0,2 também é um limite frequentemente

citado. Sendo assim, caso o RC seja maior do que o limite adotado, recomenda-se a revisão do modelo e dos julgamentos. Complementando, Saaty (1993) aponta que a inconsistência em uma matriz de decisão deve servir mais como um fator de alerta ao decisor do que um fato necessariamente indesejável.

### 3.4 COMPOSIÇÃO DO GRUPO DE TOMADA DE DECISÃO

O peso de importância (ou vetor prioridade local) das dimensões e dos indicadores de sustentabilidade foram obtidos através de um questionário enviado a um grupo de decisores. Tal questionário foi utilizado para determinar as preferências desse grupo de tomada de decisão para a comparação entre os pares dos elementos.

Segundo Costa (2002), para a eficácia dos resultados os avaliadores devem ter um alto conhecimento sobre o tópico em julgamento. Por isso, o grupo de tomada de decisão foi formado por 35 pessoas que representaram a instituição de ensino superior, os analistas ambientais de órgãos municipais e estaduais, os projetistas e construtores, a concessionária do serviço de saneamento e os usuários. A composição do grupo de decisores deu-se de modo a obter uma formação diversificada, para englobar diferentes sujeitos ligados ao esgotamento sanitário. Como também são analisados fatores sociais, entende-se necessária a representatividade dos usuários do saneamento na pesquisa. Na Tabela 6 apresenta-se as organizações e membros de cada organização que compuseram o grupo de tomada de decisão.

Tabela 6 - Composição do grupo de tomada de decisão.

<b>Organização</b>	<b>Membros da organização</b>
Instituição de Ensino Superior	3 Professores (docente) de Departamentos de Engenharia Sanitária e/ou Ambiental de universidades federais e particular.
	1 Graduando (discente) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina - ENS/UFSC.
	3 Pós-graduandos (discentes) a nível de mestrado, doutorado e pós-doutorado do ENS/UFSC.
Analista Ambiental	1 Representante do Instituto do Meio Ambiente – IMA.
	5 Representantes de fundações municipais de meio ambiente, são elas: FLORAM / Florianópolis; FAEMA / Blumenau; FUNDEMA / Balneário Piçarras; e FAMABI - Biguaçu.
	1 Representante da Vigilância Sanitária – VS / Florianópolis.
Concessionária do Serviço de Saneamento	4 Engenheiros da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN.
	3 Técnicos em Saneamento da CASAN.
Projetistas e Construtores	7 Engenheiros Cíveis ou Sanitaristas e Ambientais que atuam com projeto e/ou construção de empreendimentos com sistema de tratamento de esgoto descentralizado.
Usuário do Saneamento	7 usuários do saneamento representados por pessoas que não se enquadram em nenhuma das outras organizações listadas neste estudo.

As respostas individuais dos questionários (para cada um dos 35 integrantes do grupo de tomada de decisão) foram compiladas em um único resultado que representasse a preferência da maioria dos avaliadores sobre o julgamento entre pares. E a partir desse resultado compilado, foi definido um único vetor prioridade local para cada uma das três dimensões de sustentabilidade, bem como, para cada um dos dez indicadores de sustentabilidade.

Para a obtenção do vetor prioridade local das alternativas tecnológicas, o julgamento de preferência foi atribuído com base nas comparações entre as informações qualitativas ou quantitativas de cada alternativa. Dessa forma, foi utilizada a escala da Saaty, de modo que a menor diferença entre o valor obtido na comparação pareada por duas tecnologias fosse atribuído o valor de importância 1 (igual importância de uma sobre a outra), e para a maior diferença, o valor de importância 9 (importância absoluta de uma sobre a outra).

Assim, com as 3 dimensões (critérios), 10 indicadores (subcritérios) e 5 alternativas, e considerando as comparações par a par de elementos de um mesmo nível, foram realizadas no total 120 comparações, sendo 3 para os critérios, 17 para os subcritérios e 100 para as alternativas. Dessas, 20 (soma das comparações entre os critérios e subcritérios) foram realizadas pelo grupo de decisores e as demais 100 comparações (entre as alternativas), foram obtidas através do julgamento de preferência adotado com base nas informações qualitativas ou quantitativas. O questionário encaminhado ao grupo de decisores encontra-se no Apêndice A.

### 3.5 DEFINIÇÃO DAS FRONTEIRAS LIMITANTES DA APLICAÇÃO DO ESTUDO

Para avaliar comparativamente as tecnologias de tratamento fez-se necessária a adoção de algumas particularidades que conferiram certas limitações ao cenário em estudo. Diz-se limitações uma vez que essas podem apresentar especificidades em determinados casos. Na sequência são apresentadas tais particularidades que podem apresentar-se como fronteiras limitantes a aplicação do estudo para diferentes cenários.

#### *Levantamento de custos*

No levantamento do custo de construção (CAPEX) não foi considerado o valor da aquisição da área necessária para a implantação das tecnologias. Isso porque, o preço do metro quadrado diverge muito não só entre os municípios, mas também dentro de uma mesma cidade, no caso de se considerar área rural ou urbana. Por isso, como o objetivo desse trabalho não foi especificar o cenário para uma única região de um município, esses custos não foram acrescidos no CAPEX. Entretanto a área requerida para a implantação foi avaliada como um indicador ambiental. Além disso, outros custos específicos relacionados ao projeto, impostos e demais sistemas de tratamento complementares e disposição final também não foram considerados, tendo em vista que variam de acordo com as particularidades de cada caso.

Os custos de construção, operação e manutenção tiveram como principal fonte os dados do SINAPI para o estado de Santa Catarina referente aos valores não desonerados para o mês de julho de 2019. Ademais, para o levantamento de alguns serviços como remoção de lodo e monitoramento dos sistemas foram realizados orçamentos em prestadores desse tipo de serviço que atuam na cidade de Florianópolis.

#### *Grupo de tomadores de decisão*

Nesse estudo utilizou-se de um grupo de tomadores de decisão para incorporar as opiniões frente a sustentabilidade da tecnologia com base em seu desempenho para os indicadores ambientais, econômicos e sociais. Tal grupo foi selecionado de modo a obter um número igual de integrantes para cada organização representada, somando um total de 35 tomadores de decisão. É conveniente destacar que essa amostra é considerada relativamente pequena a ponto de generalizar a opinião desses integrantes para toda a classe do grupo representado. Dessa forma, admite-se que se fossem selecionadas diferentes pessoas para

representar esses mesmos grupos, poder-se-ia obter um diferente resultado sobre a avaliação da sustentabilidade.

#### *Indicadores sociais*

A determinação dos indicadores sociais se fez a partir de pesquisa por revisão bibliográfica. Isso pode apresentar certa subjetividade na classificação da escala conceitual desses indicadores, tendo em vista que diferentes tomadores de decisão podem classificá-las de formas distintas a partir de sua opinião frente a cada um dos indicadores.

#### *Vida útil dos sistemas de tratamento*

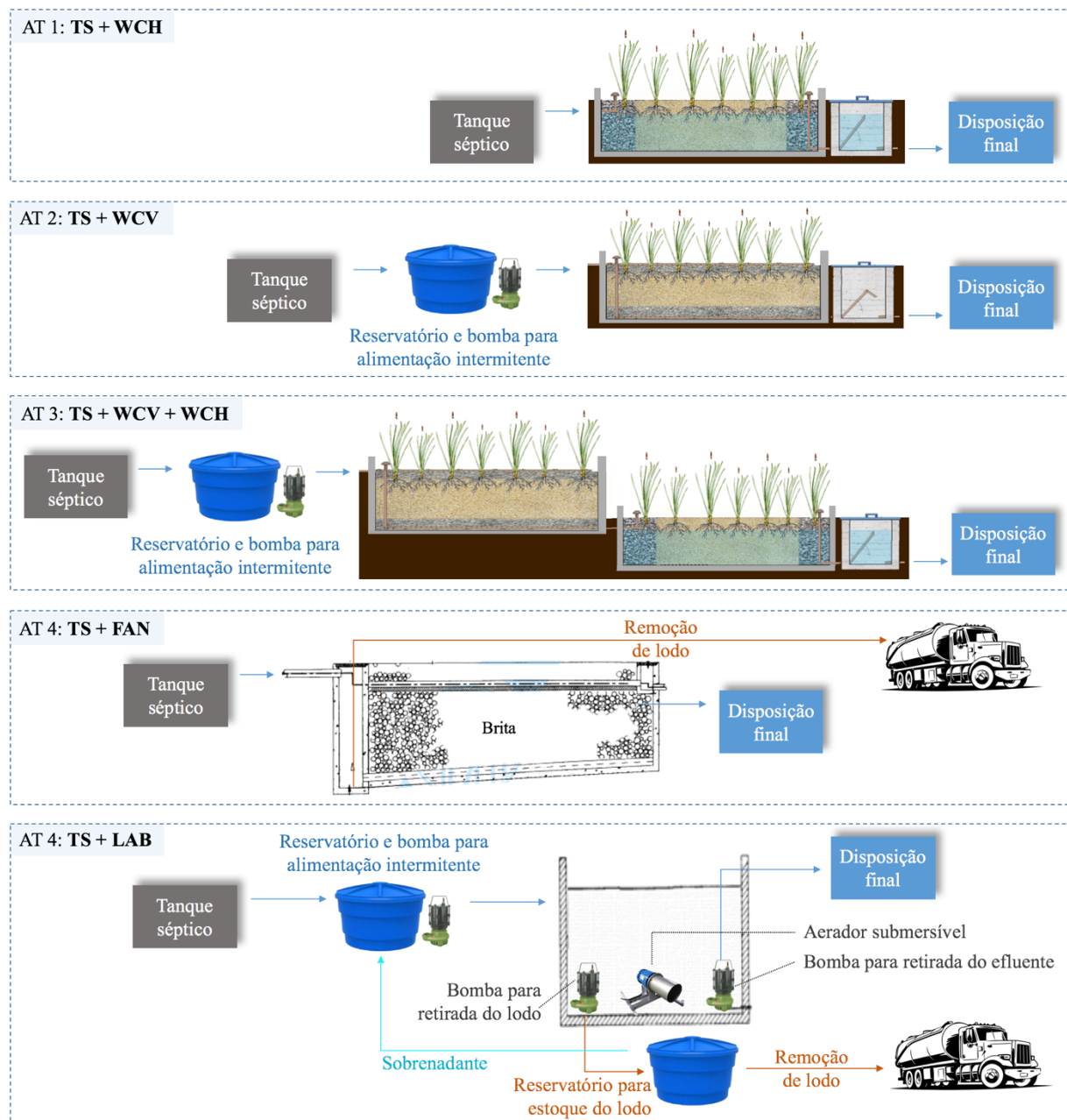
Foi adotado uma vida útil de 15 anos para cada um dos sistemas de tratamento analisados neste estudo. Apesar da literatura ter sido utilizada para embasar a adoção desse valor, sabe-se que esse período pode variar consideravelmente entre os sistemas e está muito relacionado as condições de projeto e operacionais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS ARRANJOS TECNOLÓGICOS EMPREGADOS NO TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE ESGOTO

Na Figura 8 estão representados em esquemas os arranjos tecnológicos (AT) analisados neste estudo, bem como os elementos necessários para a operação dos sistemas.

Figura 8 - Esquemas dos arranjos tecnológicos (AT) analisados empregados no tratamento descentralizado de esgoto de um equivalente populacional de 150 pessoas.





#### 4.1.1 Reservatórios para armazenamento e equipamentos eletromecânicos

Em unidades de tratamento que exijam alimentação intermitente, como é o caso do WCV (para o arranjo 2 e 3) e LAB, foi necessário prever um reservatório de armazenamento do afluente para os períodos em que não há alimentação para o sistema, e uma bomba hidráulica para garantir essa alimentação em pulsos.

Para o LAB, além do reservatório de armazenamento do afluente, também foi necessário prever para operação um reservatório destinado à reserva do lodo excedente. Para o dimensionamento desses reservatórios foi considerado o tempo do ciclo operacional. Apesar da ABNT (1997) recomendar apenas um ciclo por dia, Von Sperling (2016) cita que os sistemas projetados mais recentemente apresentam ciclos de menor duração, variando de 6 a 12 horas. Por isso, nesse estudo, adotou-se dois ciclos operacionais por dia, com 12 horas de duração para cada ciclo. A duração de cada fase (apresentada na Tabela 7) foi definida de modo a obter valores relativamente próximos aos apresentados por Von Sperling (2016).

Tabela 7 – Duração das fases do ciclo operacional do LAB.

FASE	DURAÇÃO	% DO TOTAL
Enchimento	3,5 h	29%
Reação	5,5 h	46%
Sedimentação	1,5 h	13%
Descarte	1,0 h	8%
Repouso	0,5 h	4%
<b>TOTAL</b>	<b>12 h</b>	<b>100%</b>

Vale ressaltar ainda que, para a operação do LAB, foram considerados, além da bomba hidráulica para alimentação em bateladas, outros três equipamentos eletromecânicos: um aerador submersível e duas bombas hidráulicas, uma para retirada do efluente tratado após finalização do ciclo operacional, e outra para remoção do lodo excedente. Essa configuração para o sistema foi adotada com base no que geralmente é aplicado por empresas que prestam o serviço de construção e operação de estações de tratamento do tipo LAB.

Os dimensionamentos dos reservatórios e equipamentos eletromecânicos para cada arranjo tecnológico são apresentados nas seções 4.4.1.1 e 4.4.1.2, respectivamente.

#### 4.1.2 Produção de lodo

Em processos de tratamento por filtração (como é o caso dos WC e FAN) a biomassa apresenta-se retida como uma fina camada de biofilme aderido nas superfícies do material suporte e na forma dispersa, retida nos interstícios do material suporte. Por isso, costuma-se dizer que os WC não produzem lodo (HOFFMANN *et al.*, 2011), já que não há necessidade de remoção dessa biomassa formada.

No FAN, parte da biomassa pode se desprender do material suporte e ficar retido no fundo falso do reator (CHERNICHARO, 1997). Dessa forma, a ABNT (1997) recomenda a limpeza do FAN. A operação de remoção do lodo em excesso consiste em drenar o líquido do filtro por sucção através dos dispositivos de limpeza. Essa operação pode ser auxiliada por aspersão de água, em contra fluxo, sobre o leito (CHERNICHARO, 1997; CAMPOS, 1999).

A potencial descarga de lodo em processo de lodos ativados é tida como uma das principais desvantagens do sistema (EPA, 1999). Assim, em função do grande volume gerado, para o sistema de LAB considerou-se que o lodo excedente deve ser encaminhado a um reservatório que irá armazenar essa biomassa entre os períodos de limpeza e, conseqüentemente, reduzirá o volume do lodo por adensamento. O sobrenadante gerado deve retornar ao reservatório de armazenamento do afluente.

A quantidade de lodo produzida nas unidades de tratamento é calculada na seção 4.3.

## 4.2 DIMENSIONAMENTO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Todas as cinco tecnologias avaliadas neste estudo foram projetadas para receber uma contribuição de esgoto de  $130 \text{ L.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$  e  $45 \text{ gDBO}.\text{d}^{-1}$  de carga orgânica, equivalentes a uma residência de médio padrão (ABNT, 1997). Considerando que todas as tecnologias avaliadas recebem efluente pós tanque séptico (TS), adotou-se eficiência de 30% de remoção de DBO para o tratamento primário pelo TS (CHERNICHARO, 1997; VON SPERLING, 2005). Na sequência serão apresentados os principais parâmetros de projeto adotados e o resultado do dimensionamento de cada tecnologia.

#### 4.2.1 Tecnologias normatizadas

O FAN foi dimensionado considerando um tempo de detenção hidráulico de 0,5 dias, para a temperatura média do mês mais frio do ano entre 15 e 20 °C, e projetado com 1,5 m de altura total, sendo a altura útil de 1,2 m, preenchida com brita nº 4 (ABNT, 1997).

Para o LAB considerou-se um único tanque reator, onde ocorrem as fases de enchimento, reação, sedimentação, descarte e repouso, de modo cíclico (ABNT, 1997). Apesar da adoção de dois ou mais tanques permitir maior folga operacional (VON SPERLING, 2016), percebe-se que a opção de apenas um reator é uma prática comum nas unidades implantadas em escala real, além de apresentar menores custos de implantação. O volume do tanque reator foi dimensionado em 39 m<sup>3</sup>, calculado com base na vazão de entrada e armazenamento do lodo.

Um resumo dos parâmetros de projeto adotados para o dimensionamento das tecnologias normatizadas é apresentado na Tabela 8. Na seção 4.2.3 são apresentados os resultados desse dimensionamento, e no Apêndice B, a planilha de cálculo.

Tabela 8 - Parâmetros de projeto para dimensionamento do filtro anaeróbio e lodo ativado por batelada.

PARÂMETROS DE PROJETO	FAN	LAB
Equivalente populacional	150 hab	150 hab
Contribuição de esgoto	130 L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	130 L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>
Carga orgânica afluyente	45 gDBO.d <sup>-1</sup>	45 gDBO.d <sup>-1</sup>
Eficiência do TS	30%	30%
Tempo de detenção hidráulico	0,5 d	Não se aplica
Altura útil do reator	1,2 m	3,0 m
Altura de lodo	Não se aplica	1,5 m
Borda livre	0,30 m	0,5 m

#### 4.2.2 Wetlands Construídos

Os WCH e WCV foram dimensionados para uma taxa de aplicação orgânica superficial de 15 e 20 gDBO.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, respectivamente. Para ambos os sistemas foi previsto a areia grossa como material filtrante, sendo a brita utilizada para melhorar a distribuição do afluyente e a coleta do efluente. Para o WCH foi considerada brita nº 4, enquanto que para o WCV, brita nº 1 (VON SPERLING; SEZERINO, 2018). A disposição dos materiais filtrantes para o WCH e WCV pode ser observada na Figura 9 e Figura 10, nessa ordem.

Figura 9 - Disposição do material filtrante em WCH (vista de perfil).

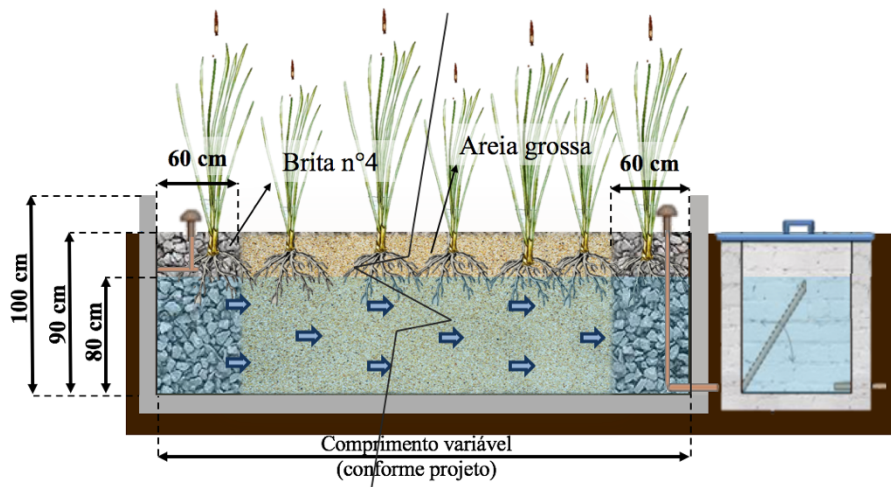
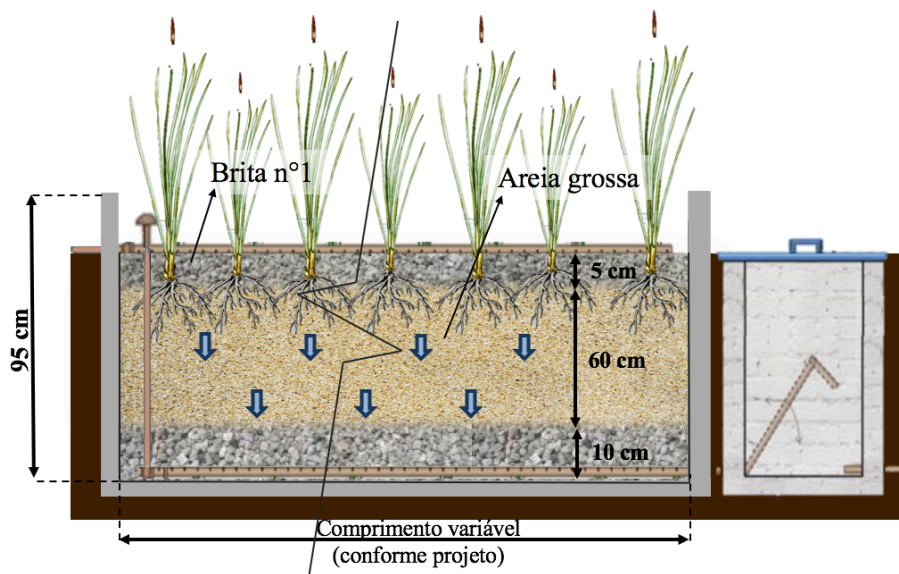


Figura 10 - Disposição do material filtrante em WCV (vista de perfil).



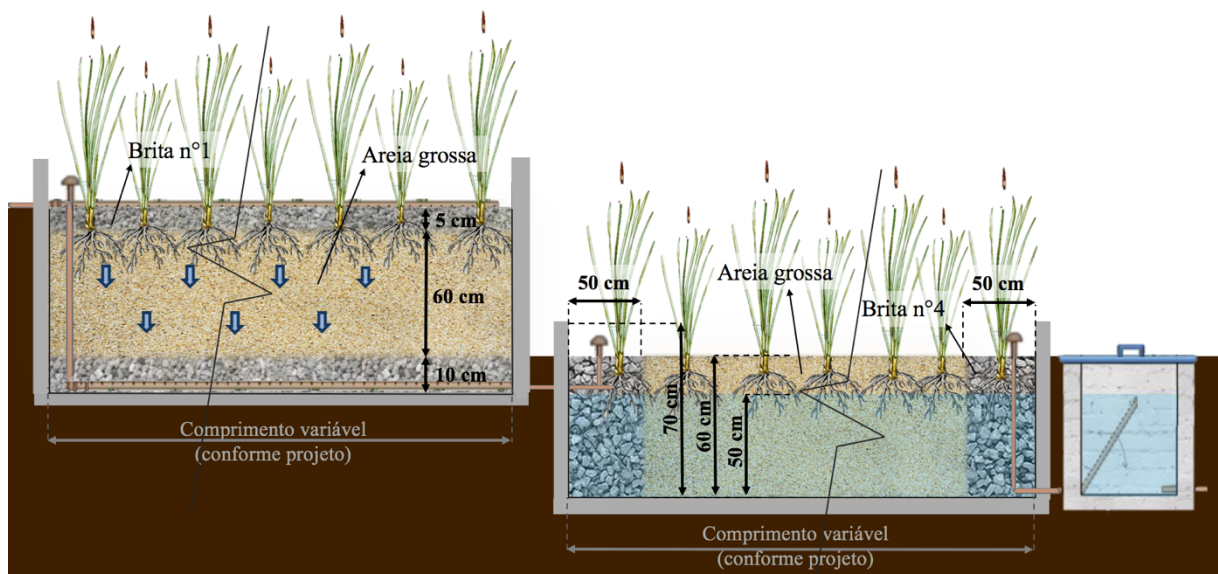
O WCV componente do sistema híbrido seguiu os mesmos critérios de projeto adotados para o WCV descritos anteriormente. No entanto, o WCH desse arranjo possui algumas particularidades no dimensionamento, tendo em vista que esse recebe efluente tratado por um WCV, ou seja, com boa remoção de matéria orgânica.

Apesar de Von Sperling e Sezerino (2018) sugerirem que a edição especial do Boletim Wetlands Brasil seja utilizada como referência para o dimensionamento de WC recebendo afluente previamente tratado em nível primário ou em nível secundário com eficiência limitada

na remoção de matéria orgânica, neste estudo, esse documento também foi utilizado para definir os critérios de projeto do WCH do sistema híbrido. Entende-se que a aplicação desses critérios para um WCH que recebe efluente menos concentrado está a favor da segurança, uma vez que os fluxos com menores cargas orgânicas afluentes tenderão a prolongar a vida útil do sistema, além disso, o dimensionamento resulta em maior área superficial, a fim de garantir o limite da taxa hidráulica.

Dessa forma, afim de respeitar os limites máximos previstos para a taxa hidráulica superficial afluyente, e prevendo eficiência de 85% de remoção de DBO no WCV, o WCH do sistema híbrido foi dimensionado para receber uma carga orgânica superficial de  $2,91 \text{ gDBO} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , garantindo assim, a máxima taxa hidráulica permitida, de  $0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (VON SPERLING; SEZERINO, 2018). Essa relação de baixo carregamento orgânico e alta taxa hidráulica está relacionada com a boa qualidade do afluyente ao WCH, e a vazão de entrada do sistema. Para o sistema híbrido, a disposição dos materiais filtrantes é apresentada na Figura 11.

Figura 11 - Disposição do material filtrante em sistema híbrido (vista de perfil).



Um resumo dos parâmetros de projeto adotados para o dimensionamento dos wetlands construídos é apresentado na Tabela 9. Na seção 4.2.3 são apresentados os resultados desse dimensionamento, e no Apêndice B, a planilha de cálculo detalhada para cada unidade de WC.

Tabela 9 - Parâmetros de projeto para dimensionamento dos wetlands construídos.

PARÂMETROS DE PROJETO	WCH	WCV	SISTEMA HÍBRIDO
Equivalente populacional	150 hab	150 hab	150 hab
Contribuição de esgoto	130 L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	130 L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	130 L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>
Carga orgânica afluenta	45 gDBO.d <sup>-1</sup>	45 gDBO.d <sup>-1</sup>	45 gDBO.d <sup>-1</sup>
Eficiência do TS	30%	30%	30%
Eficiência do WCV para DBO	Não se aplica	Não se aplica	85%
Taxa de aplicação orgânica superficial	15 gDBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	20 gDBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	WCV: 20 gDBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> WCH: 2,91 gDBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>
Taxa de aplicação hidráulica superficial	0,06 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	0,08 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	WCV: 0,08 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> WCH: 0,08 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>
Altura do material filtrante	0,90 m	0,60 m	WCV: 0,60 m WCH: 0,60 m
Borda livre	0,10 m	0,20 m	WCV: 0,20 m WCH: 0,10 m
Altura camada de suporte (superior)	Não se aplica	0,05 m	WCV: 0,05 m WCH: Não se aplica
Altura camada de drenagem (inferior)	Não se aplica	0,10 m	WCV: 0,10 m WCH: Não se aplica
Largura zona de entrada	0,60 m	Não se aplica	WCV: Não se aplica WCH: 0,50 m
Largura zona de saída	0,60 m	Não se aplica	WCV: Não se aplica WCH: 0,50 m

Deve-se considerar que a estratégia de operação relacionada à alternância de uso, que prevê parte da área em operação enquanto outra parte permanece em descanso, é um critério de projeto muito importante, o qual além de influenciar na boa operação do sistema, também interfere na área necessária para o dimensionamento da tecnologia. Nesse estudo, foi prevista a alternância de uso especificamente para o WCV. Nesse caso, considerou-se uma estratégia operacional de  $\frac{3}{4}$  em operação e  $\frac{1}{4}$  em descanso (VON SPERLING; SEZERINO, 2018).

Com relação a forma de operar o WCH, ressalta-se que apesar de Von Sperling e Sezerino (2018) recomendarem a utilização de unidades em paralelo (para operação e descaso), esses também citam a possibilidade de adoção de apenas uma unidade operando. Ademais, observa-se que essa configuração com apenas um módulo é uma prática comum em sistemas implantados em escala real. Por isso, considerou-se nesse estudo o dimensionamento de apenas uma unidade de WCH em operação, sem prever necessidade de alternância de uso.

#### 4.2.3 Resultados do dimensionamento das tecnologias

Na Tabela 10 apresentam-se as dimensões obtidas para as tecnologias a partir do dimensionamento.

Tabela 10 - Dimensões das tecnologias de tratamento.

TECNOLOGIA/ DIMENSÕES	WCH	WCV	SISTEMA HÍBRIDO	FAN	LAB
Número de reatores	3 reatores	4 reatores	WCV: 4 reatores WCH: 1 reator	1 reator	1 reatores
Altura útil	0,90 m	0,75 m	WCV: 0,75 m WCH: 0,60 m	1,20 m	3,00 m
Altura total	1,00 m	0,95 m	WCV: 0,95 m WCH: 0,70 m	1,50 m	3,50 m
Largura (por reator)	7,25 m	6,55 m	WCV: 6,55 m WCH: 11,00 m	2,50 m	3,60 m
Comprimento (por reator)	14,50 m	12,00 m	WCV: 12,00 m WCH: 22,20 m	5,20 m	3,60 m
Área superficial em operação	315,00 m <sup>2</sup>	236,25 m <sup>2</sup>	WCV: 236,25 m <sup>2</sup> WCH: 243,75 m <sup>2</sup>	13,00 m <sup>2</sup>	13,00 m <sup>2</sup>
Área superficial em descanso	Não se aplica	78,75 m <sup>2</sup>	WCV: 78,75 m <sup>2</sup> WCH: Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Área superficial total	315,00 m <sup>2</sup>	315,00 m <sup>2</sup>	558,75 m <sup>2</sup>	13,00 m <sup>2</sup>	13,00 m <sup>2</sup>
Volume útil total	283,50 m <sup>3</sup>	236,25 m <sup>3</sup>	382,50 m <sup>3</sup>	15,60 m <sup>3</sup>	39 m <sup>3</sup>

A partir da Tabela 10 verifica-se que as maiores exigências por áreas superficiais foram para o sistema híbrido, WCV e WCH, respectivamente. Esse resultado já era esperado, tendo em vista que os WC são tecnologias extensivas, por exigirem grande área para sua construção, diferentemente do LAB e FAN, que são tecnologia de tratamento com reduzido requisito de área. A relação de área e volume útil por habitantes é apresentada na Tabela 11. Deve-se notar que, embora o WCV e WCH obtiveram o mesmo requisito de área, para o WCH a totalidade da área é destinada a operação, uma vez que não se adotou alternância de uso. Já para o WCV uma parcela (3/4) dessa área total de construção é destinada a operação, enquanto o restante (1/4) permanece em descanso.

Tabela 11 - Relativização de área e volume por habitante.

TECNOLOGIA	ÁREA/HABITANTE (m <sup>2</sup> .hab <sup>-1</sup> )	VOLUME ÚTIL/HABITANTE (m <sup>3</sup> .hab <sup>-1</sup> )
WCH	2,10	1,89
WCV	2,10	1,58
Sistema Híbrido	3,73	2,55
FAN	0,09	0,10
LAB	0,09	0,26

### 4.3 PRODUÇÃO DE LODO

Para efeito de comparação do aspecto ambiental, com base na quantidade de lodo produzido, foi considerado que o volume de lodo removido por limpeza no FAN é equivalente aos espaços vazios do material filtrante, que são ocupados pelo líquido e biomassa. Assim, considerando uma porosidade de 49% para a brita (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; DECEZARO, 2018) e com 15,6 m<sup>3</sup> de volume útil (seção 4.2.3), a quantidade de lodo removido a cada limpeza do FAN é de 7,6 m<sup>3</sup>. Recomenda-se que seja realizada a remoção do lodo em excesso no FAN com uma frequência de três a seis meses (ANDRADE NETO, 1997; CAMPOS, 1999). Nesse estudo, adotou-se a frequência semestral para limpeza.

A quantidade de lodo excedente retirada do LAB foi calculada pela multiplicação da carga orgânica afluenta ao reator, de 4,73 kgDBO.d<sup>-1</sup> (considerando a eficiência do tratamento primário) pelo coeficiente de produção celular (Y) adotado como sendo de 0,80 kgSST.kgDBO<sup>-1</sup> (VON SPERLING, 2007a). Assim, devem ser retirados diariamente do reator e encaminhados ao reservatório de lodo, cerca de 3,78 kgSST.d<sup>-1</sup>, correspondente a um volume líquido de 1,51 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>, se considerada uma concentração de sólidos em suspensão durante a fase de reação igual a 2500 mg/L (EPA, 1993; VON SPERLING, 2007a).

Estima-se que no reservatório de armazenamento de lodo a concentração de sólidos no lodo adensado, considerando uma boa sedimentabilidade, seja de 30000 mg.L<sup>-1</sup> (VAN HAANDEL; MARAIS, 1999). Assim, com a massa de sólidos em excesso (3,78 kgSST.d<sup>-1</sup>) e um tempo de estoque de 31 dias, calcula-se o volume total de 3,91m<sup>3</sup> de lodo adensado.

### 4.4 CUSTOS DE CONSTRUÇÃO - CAPEX

Na Tabela 12 são apresentados os itens que compõem as despesas relacionadas com a construção das tecnologias. É importante destacar que, com relação ao modo de construção, considerou-se nesta pesquisa que os WC seriam construídos a partir da escavação do solo, sem a construção de alvenaria, apenas com impermeabilização do solo. Enquanto que para as tecnologias normatizadas, adotou-se o modo de construção com alvenaria em concreto. Sendo assim, para construção da estrutura do FAN e LAB considerou-se os seguintes passos: (1) escavação; (2) montagem das fôrmas para viga baldrame e cinta superior; (3) colocação de brita para preparo da laje; (4) armação da laje; (5) concretagem da laje; (6) assentamento dos tijolos



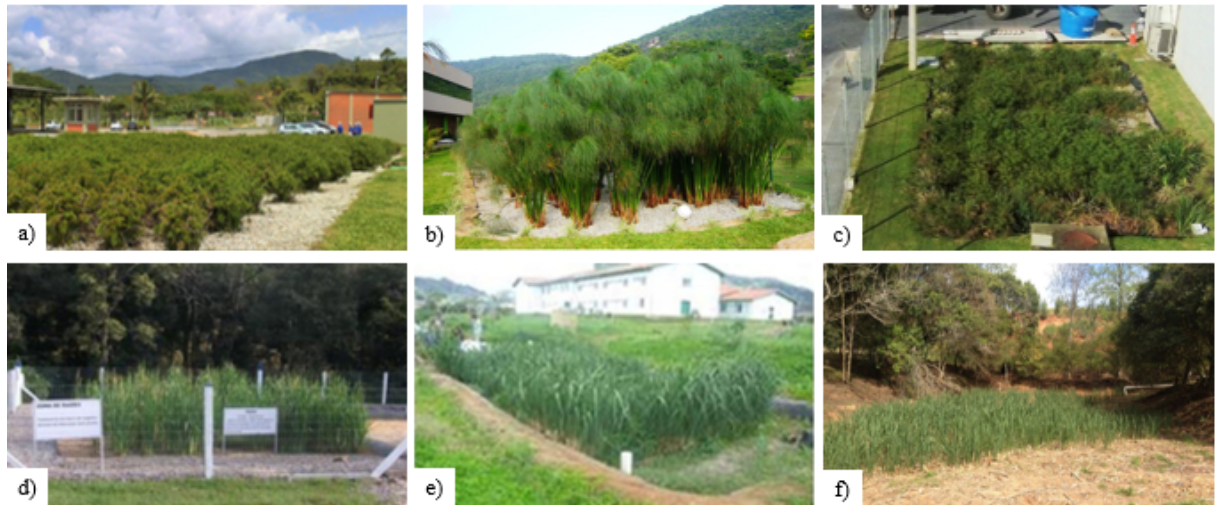
com argamassa; (7) armação e grauteamento da cinta superior; (8) chapisco e reboco das paredes internas; e (9) fechamento da estrutura.

Essa diferença do modo de construção adotado para os WC e tecnologias normatizadas teve como base o que comumente é aplicado em unidades de tratamento descentralizado com o porte semelhante ao adotado neste estudo. Nas Figura 12 e Figura 13 apresentam-se essas diferenças no modo de construção para as tecnologias analisadas.

Tabela 12 - Itens que compõem os custos de construção – CAPEX.

ITENS PARA LEVANTAMENTO DE CAPEX		WCH	WCV	Sistema Híbrido	FAN	LAB
MATERIAIS	Material filtrante	✓	✓	✓	✓	
	Tubulações e acessórios para conexão	✓	✓	✓	✓	
	Plantas	✓	✓	✓		
	Manta termoplástica PEAD	✓	✓	✓		
	Tijolos, argamassa com impermeabilizante, concreto, pedra britada, aço, fôrmas				✓	✓
	Reservatório		✓	✓		✓
EQUIPAMENTOS	Bombas submersíveis		✓	✓		✓
	Aerador submersível					✓
MAQUINÁRIOS	Retroescavadeira	✓	✓	✓	✓	✓
	Betoneira				✓	✓
SERVIÇO	Mão de obra	✓	✓	✓	✓	✓
	Instalação de equipamentos		✓	✓		✓

Figura 12 – Fotos ilustrativas de wetlands construídos implantados em escala real com modo de construção escavado no solo, sem alvenaria em concreto.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Rotária do Brasil (2019), Rodrigues (2015) e Acervo GESAD.  
 Obs.: Os WC são para a) fábrica em Biguaçu para um equivalente populacional de 300 habitantes; b e c) centro comercial em Florianópolis para um equivalente populacional de 125 e 110 habitantes, respectivamente; d) escola em Campos Novos para um equivalente populacional de 190 habitantes; e) pousada rural com 150 habitantes; e f) centro de treinamentos com 200 habitantes.

Figura 13 – Fotos ilustrativas de lodo ativado em batelada (a e c) e filtro anaeróbio (b e d) implantados em escala real com modo de construção escavados no solo com alvenaria em concreto.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Rotária do Brasil (2019) e acervo próprio.

Na sequência são apresentados os itens que compõem o CAPEX, a forma como foram quantificados e os custos associados. O quantitativo detalhado dos materiais, equipamentos, maquinários e serviços, bem como o custo de cada item são apresentados no Apêndice C.

#### 4.4.1.1 Materiais

Para a construção dos módulos de WC foram levantados como materiais a manta termoplástica de Polietileno de Alta Densidade – PEAD (para impermeabilizar o solo), o material filtrante (brita e areia), as tubulações e acessórios (como cap, curva e te), as macrófitas e reservatório de armazenamento (exceto para o WCH).

Na quantificação das plantas, considerou-se uma densidade de 4 plantas por metro quadrado de área superficial (PHILIPPI; SEZERINO, 2004). Existem diversas espécies que podem ser utilizadas como macrófitas nos WC (VON SPERLING; SEZERINO, 2018). As espécies do gênero *Typha* (popularmente conhecida como taboa), são provavelmente as plantas de ambiente aquático mais frequentes em todo o mundo (GALLARDO-WILLIAMS *et al.*, 2002), e por isso, são muito comuns em WC, sobretudo em unidades horizontais (SEZERINO *et al.*, 2015a). Porém, não são facilmente encontradas em empresas fornecedoras de plantas. Quando implantada em sistema de WC, a taboa é geralmente retirada de banhados naturais.

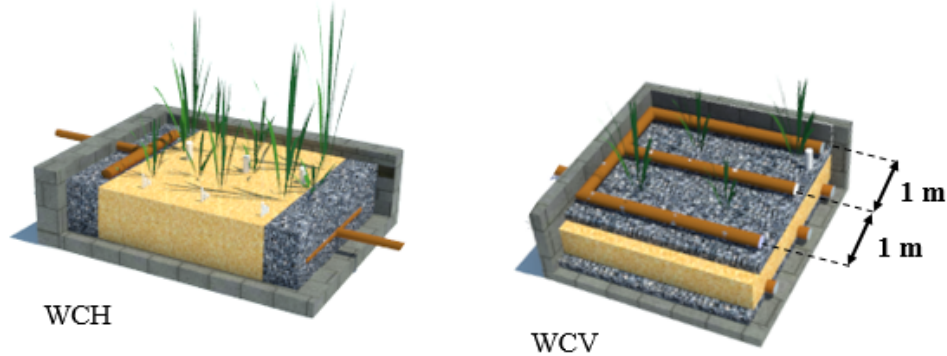
Assim, para quantificar os custos das macrófitas no sistema, foram realizados orçamentos em empresas fornecedoras de plantas. Em função da facilidade de encontrar as espécies no mercado e considerando do custo da muda, fatores determinantes para a escolha da espécie (SEZERINO *et al.*, 2018), optou-se pela *Heliconia psittacorum* (conhecida popularmente por Helicônia), que apresentou o custo de R\$ 6,00 por muda.

Os reservatórios para os arranjos tecnológicos de TS+WCV e TS+WCV+WCH foram dimensionados considerando a capacidade de armazenar o afluente por um período de 4 horas, tempo esse adotado como sendo o intervalo entre pulsos de alimentação para os WCV (VON SPERLING; SEZERINO, 2018). Assim, o volume mínimo necessário para o armazenamento do afluente nos arranjos 2 e 3 é de 3,25 m<sup>3</sup>.

O quantitativo das tubulações e acessórios de conexão foi realizado considerando que nos WCH são dispostas tubulações apenas nas zonas de entrada e saída, enquanto que para os WCV duas redes de tubulações em conformação similar a uma grelha são distribuídas, uma sobre a superfície (para alimentação) e outra ao fundo do material filtrante (para coleta do

efluente). Nessa rede em forma de grelha, foram adotados espaçamentos de 1 metro entre as tubulações posicionadas ao longo do comprimento (Figura 14).

Figura 14 - Tubulações de distribuição e coleta do efluente nos wetlands



O custo total com a aquisição de materiais para construção do WCH, WCV e sistema híbrido, considerando o equivalente populacional de 150 habitantes, foi de R\$ 38.841,15; R\$39.794,27 e R\$ 62.801,70, respectivamente (Tabela 13).

No caso do FAN e LAB, os materiais levantados para a construção da estrutura em alvenaria foram: tijolos, cimento e areia (para preparo da argamassa), impermeabilizante, concreto, aço, forma de madeira e pedra britada. Além disso, também foram consideradas as tubulações e material filtrante para o FAN. E para o LAB, os reservatórios para armazenar o afluente e o lodo excedente.

O reservatório para armazenar o afluente do LAB foi calculado com base na acumulação de esgoto durante a duração de um ciclo operacional completo (12 horas), tempo esse que o reator não recebe contribuição. Já o dimensionamento do reservatório para lodo excedente, levou-se em consideração o volume de lodo adensado e a frequência de remoção por caminhão de limpeza (3,91 m<sup>3</sup> de lodo adensado removido por mês, conforme seção 4.3). Assim, o reservatório para o afluente e para o lodo foram dimensionados com volumes mínimos de 9,75 m<sup>3</sup> e 3,91 m<sup>3</sup>, nessa ordem.

Para quantificar as tubulações e acessórios para conexão no FAN, considerou-se que a rede de distribuição e coleta é semelhante a conformação apresentada para o WCV (Figura 14), inclusive também foi adotado o espaçamento de 1 metro entre as tubulações posicionadas ao longo do comprimento.

É importante ressaltar que não foram quantificadas as tubulações para o LAB, uma vez que essa unidade não possui extensões consideráveis de tubulação para distribuição do efluente

(como é o caso das demais tecnologias analisadas). Além disso, também não foram quantificadas as tubulações para a rede coletora anterior as tecnologias, pois as distâncias entre a fonte geradora e sistemas de tratamento são essenciais para esse levantamento, sendo particularidades de cada projeto.

Assim sendo, o custo total com os materiais para a construção FAN e LAB, considerando o cenário em estudo, foi de R\$7.185,60 e R\$ 12.380,37, nessa ordem (Tabela 14).

Tabela 13 - Custo de materiais para construção dos sistemas com WC.

TECNOLOGIA / DESCRIÇÃO DO MATERIAL	WCH		WCV		SISTEMA HÍBRIDO		FONTE
	Quant.	Custo total	Quant.	Custo total	Quant.	Custo total	
Material filtrante	Brita: 24 m <sup>3</sup> Areia: 260 m <sup>3</sup>	R\$23.338,81	Brita: 47 m <sup>3</sup> Areia: 189 m <sup>3</sup>	R\$18.753,53	Brita: 55 m <sup>3</sup> Areia: 327 m <sup>3</sup>	R\$30.858,12	SINAPI <sup>1</sup>
Manta PEAD	446 m <sup>2</sup>	R\$7.439,28	457 m <sup>2</sup>	R\$7.622,76	747 m <sup>2</sup>	R\$12.459,96	SINAPI <sup>1</sup>
Tubulação e conexões	Tubo: 50 m Te: 6 unid. Cap: 12 unid.	R\$503,06	Tubo: 732 m Te: 8 unid. Cap: 56 unid. Curva: 16 unid.	R\$5.703,04	Tubo: 756 m Te: 10 unid. Cap: 60 unid. Curva: 16 unid.	R\$5.918,68	SINAPI <sup>1</sup>
Plantas	1260 unid.	R\$7.560,00	1260 unid.	R\$7.560,00	2235 unid.	R\$13.410,00	Empresa fornecedora
Reservatório	-	R\$0,00	1 reservatório de 500 L	R\$154,94	1 reservatório de 500 L	R\$154,94	SINAPI <sup>1</sup>
<b>TOTAL</b>	-	<b>R\$ 38.841,15</b>	-	<b>R\$ 39.794,27</b>	-	<b>R\$62.801,70</b>	-

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI.

Tabela 14 - Custos de materiais para construção do FAN e LAB.

TECNOLOGIA / DESCRIÇÃO MATERIAL	FAN		LAB		FONTE
	Quant.	Custo total	Quant.	Custo total	
Materiais para a construção da estrutura em alvenaria	<i>Quantitativo detalhado no Apêndice C</i>		<i>Quantitativo detalhado no Apêndice C</i>		SINAPI <sup>1 e 2</sup>
Material filtrante	Brita: 16 m <sup>3</sup>	R\$ 1.063,61	-	R\$ 0,00	SINAPI <sup>1</sup>
Tubulação e conexões	Tubo: 36 m Te: 1 unid. Cap: 6 unid. Curva: 2 unid.	R\$ 355,17	-	R\$ 0,00	SINAPI <sup>1</sup>
Reservatório	-	R\$ 0,00	Reservatório afluente: 10 m <sup>3</sup> Reservatório lodo: 5m <sup>3</sup>	R\$ 5.144,65	SINAPI <sup>1</sup>
<b>TOTAL</b>	-	<b>R\$ 7.185,60</b>	-	<b>R\$ 12.380,37</b>	-

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI.

2 – Valores referentes a tabela de composições do SINAPI.

#### 4.4.1.2 Equipamentos eletromecânicos

Os equipamentos são referentes as bombas hidráulicas e aerador submersível. Vale ressaltar que todas as bombas hidráulicas quantificadas nesse estudo são do tipo submersíveis com rotor semiaberto, de modo a oferecer maior segurança no transporte de efluentes líquidos podendo conter sólidos suspensos.

A determinação das características da bomba hidráulica para o WCV (arranjos 2 e 3) foi baseada no fluxo hidráulico bombeado de  $4 \text{ L.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$  da estação experimental de WC do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD), garantindo o balanço positivo de oxigênio ao sistema. A partir desse fluxo e com a área superficial de cada unidade calculou-se a vazão de bombeamento, quesito utilizado para definir o equipamento e levantar o custo da bomba pelo SINAPI.

Com a capacidade necessária de recalque e analisando as possíveis combinações de motobombas disponíveis nas tabelas do SINAPI para suprir a demanda, optou-se, em função do custo de aquisição, pelo conjunto de duas bombas operando em paralelo, além de mais uma unidade de reserva. Assim, para cada arranjo tecnológico com o WCV são necessárias 3 bombas submersíveis de rotor semiaberto com capacidade total de bombeamento de  $56,7 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ .

No LAB, para a seleção do aerador considerou-se a demanda total por oxigênio para a fase de reação como 2,5 vezes a carga orgânica afluyente diária (ABNT, 1997), equivalente a  $0,70 \text{ kgO}_2.\text{h}^{-1}$ . Conforme ficha técnica fornecida por um fabricante de sistemas de aeração, essa capacidade de projeto é suprida por um aerador submersível com taxa de transferência de oxigênio de  $1,6 \text{ kgO}_2.\text{Kwh}^{-1}$ , rendimento de 85% do motor e potência de 1,5 CV.

As características das bombas hidráulicas para o LAB foram determinadas com base nas vazões de bombeamento. As vazões de alimentação e retirada do efluente tratado foram obtidas a partir do volume de enchimento por ciclo ( $19,5 \text{ m}^3$ , desconsiderando o volume ocupado pelo lodo) e da duração da fase de enchimento ou da fase de esvaziamento (ambas apresentadas na Tabela 7), resultando uma vazão de alimentação de  $5,6 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  e de retirada de  $19,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ . A vazão de retirada do lodo excedente, calculada em  $1,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ , foi determinada segundo o volume de lodo removido por dia (detalhado na seção 4.3) e a duração das fases de repouso no dia.

Para garantir a segurança de operação, foi considerada uma bomba reserva para a alimentação do sistema de LAB. Essa unidade de reserva também pode ser utilizada em substituição aos sistemas de bombeamento de lodo excedente e efluente tratado, em caso de problemas no funcionamento do equipamento mecânico.

Com base na tabela de insumos do SINAPI, o modelo de bomba submersível de rotor semiaberto com a menor capacidade de bombeamento (consequentemente menor custo de aquisição) possui faixas de vazões superiores as necessidades calculadas. Realizando uma busca no mercado por modelos com faixas de vazões menores, observou-se que o custo de compra do equipamento é semelhante ao custo da motobomba de menor capacidade apresentada pelo SINAPI. Por isso, para todos os casos de motobombas para o LAB, WCV e sistema híbrido considerou-se o modelo disponível no SINAPI, capazes de suprir as necessidades calculadas.

A necessidade de equipamentos para cada tecnologia, bem como o quantitativo e custos são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Quantitativo de equipamentos necessários relacionados às tecnologias dimensionadas.

TECNOLOGIA	DESCRIÇÃO	QUANT.	CUSTO TOTAL	FONTE
WCV	Bomba submersível de rotor semiaberto, potência 0,98 HP, Hm/Q = 2m/32m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> a 8m/16m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	3 unid.	R\$ 6.944,46	SINAPI <sup>1</sup>
SISTEMA HÍBRIDO	Bomba submersível de rotor semiaberto, potência 0,98 HP, Hm/Q = 2m/32m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> a 8m/16m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	3 unid.	R\$ 6.944,46	SINAPI <sup>1</sup>
LAB	Aerador mecânico, 1,5 CV	1 unid.	R\$ 9.050,00	Empresa fornecedora do equipamento
	Bomba submersível de rotor semiaberto, potência 0,98 HP, Hm/Q = 2m/32m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> a 8m/16m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	4 unid.	R\$ 9.259,28	SINAPI <sup>1</sup>

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI.

#### 4.4.1.3 Maquinários

Foram levantados como maquinários a retroescavadeira para todos os sistemas e a betoneira para o FAN e LAB. Para os WC, a retroescavadeira foi orçada para a escavação das unidades no solo e, também, para colocação do material filtrante, pois em função da elevada área superficial, não é recorrente o trabalho manual para esse serviço.

O custo com a retroescavadeira foi definido com base no custo unitário por metro cúbico escavado, definido por composições do SINAPI. Já os custos com a betoneira foram obtidos a partir do valor da hora de uso do equipamento. A quantidade de horas foi calculada com base na composição de custos do SINAPI. Nessa composição são quantificados os materiais, equipamentos e mão de obra que compõem o custo unitário de um serviço. Dessa forma, para determinar as horas de uso da betoneira, relativo ao preparo de argamassa, considerou-se a



quantidade de horas do uso desse maquinário para preparar 1 m<sup>3</sup> de argamassa (valor unitário), multiplicando-se ao final esse valor pelo volume de argamassa produzida.

Na Tabela 16 são apresentados os quantitativos e custos dos maquinários para cada tecnologia.

Tabela 16 - Quantitativo de maquinários empregados na construção das tecnologias estudadas.

TECNOLOGIA	DESCRIÇÃO	QUANT.	CUSTO TOTAL	FONTE
WCH	Retroescavadeira	599 m <sup>3</sup> *	R\$ 5.165,06	SINAPI <sup>2</sup>
WCV	Retroescavadeira	536 m <sup>3</sup> *	R\$ 4.621,37	SINAPI <sup>2</sup>
SISTEMA HÍBRIDO	Retroescavadeira	852 m <sup>3</sup> *	R\$ 7.356,00	SINAPI <sup>2</sup>
FAN	Retroescavadeira	47 m <sup>3</sup>	R\$ 406,68	SINAPI <sup>2</sup>
	Betoneira	57 h	R\$ 196,46	SINAPI <sup>1</sup>
LAB	Retroescavadeira	74 m <sup>3</sup>	R\$ 640,68	SINAPI <sup>2</sup>
	Betoneira	100 h	R\$ 343,24	SINAPI <sup>1</sup>

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI.

2 – Valores referentes a tabela de composições do SINAPI.

\* Quantidade relativa a escavação e colocação do material filtrante.

#### 4.4.1.4 Serviços

Parte do custo com mão de obra foi obtido em função do custo da hora do profissional relacionado com a construção das tecnologias. A quantificação das horas necessárias foi obtida com base nos custos de composição do SINAPI para alguns serviços (de modo semelhante ao descrito para obtenção das horas de uso da betoneira).

Assim, para os WC foram consideradas as horas de um pedreiro e servente de obras para execução da (i) impermeabilização de superfície com geomembrana; (ii) instalações de tubulações; e (iii) plantio das macrófitas. Já para FAN e LAB, as horas da mão de obra foram quantificadas com base nos serviços de: (i) montagem de fôrmas; (ii) armação e concretagem da laje; (iii) preparo de argamassa; (iv) assentamentos dos tijolos; e (v) armação e grauteamento da cinta superior. No caso do FAN também se considerou a montagem de tubulações.

Além desses custos das horas de mão de obra, também foram quantificados os serviços de (i) instalação do conjunto motobomba, especificamente para o WCV e sistema híbrido, obtido com base na potência do equipamento; (ii) colocação de brita para o preparo da laje do FAN e LAB, bem como para preenchimento do FAN, calculado com base no volume colocado; e (iii) para o caso particular do LAB, definiu-se o custo da automação do sistema a partir de orçamento realizado em empresa prestadora do serviço.

Com relação ao valor do serviço de automação do LAB vale destacar que esses custos incluem além das instalações das bombas e do aerador submersível, todo o restante da automação do sistema para o funcionamento adequado dos ciclos operacionais, como: os sensores de nível, atuadores elétricos, painel elétrico, instalações hidráulicas, entre outros. Apesar de alguns desses itens serem materiais, não foi possível obter os custos separados, pois a automação é um serviço prestado com valor fechado pelas empresas especializadas.

Na Tabela 17 são apresentados os quantitativos e custos desses serviços descritos.

Tabela 17 - Quantitativo de serviços empregados na construção das tecnologias estudadas.

TECNOLOGIA	DESCRIÇÃO	QUANT.	CUSTO TOTAL	FONTE
WCH	Pedreiro de obras	124,8 h	R\$2.425,49	SINAPI <sup>1</sup>
	Servente de obras	174,7 h	R\$2.417,36	SINAPI <sup>1</sup>
WCV	Pedreiro de obras	386,2 h	R\$7.503,71	SINAPI <sup>1</sup>
	Servente de obras	436,0 h	R\$6.034,59	SINAPI <sup>1</sup>
	Instalação de conjunto motobomba submersível até 10 CV	3 unid.	R\$592,41	SINAPI <sup>2</sup>
SISTEMA HÍBRIDO	Pedreiro de obras	466,2 h	R\$9.057,92	SINAPI <sup>1</sup>
	Servente de obras	554,6 h	R\$7.675,34	SINAPI <sup>1</sup>
	Instalação de conjunto motobomba submersível até 10 CV	3 unid.	R\$592,41	SINAPI <sup>2</sup>
FAN	Pedreiro de obras	85,7 h	R\$1.664,43	SINAPI <sup>1</sup>
	Servente de obras	85,9 h	R\$1.188,61	SINAPI <sup>1</sup>
	Colocação de material filtrante e pedregulho	16,3 m <sup>3</sup>	R\$1.466,47	SINAPI <sup>2</sup>
LAB	Pedreiro de obras	99,1 h	R\$1.924,95	SINAPI <sup>1</sup>
	Servente de obras	105,0 h	R\$1.452,58	SINAPI <sup>1</sup>
	Colocação de pedregulho	0,65 m <sup>3</sup>	R\$58,39	SINAPI <sup>2</sup>
	Automação do sistema	1 unid.	R\$15.240,72	Prestador de serviço

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI.

2 – Valores referentes a tabela de composições do SINAPI.

#### 4.5 CUSTOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO – OPEX

Na

Tabela 18 são apresentados os itens que compõem os custos de operação e manutenção para cada tecnologia. Cabe destacar que nessa avaliação considerou-se como vida útil de projeto o período de 15 anos, adotado com base na literatura. Estima-se que durante esse período não seja necessário realizar nenhuma renovação do sistema, como a troca de material filtrante e/ou de equipamento mecânico em nenhuma das tecnologias analisadas. A descrição sobre a obtenção dos custos de OPEX é detalhada na sequência.

Tabela 18 - Itens que compõem os custos de operação e manutenção – OPEX das tecnologias estudadas.

TECNOLOGIAS / ITENS PARA OPEX	WCH	WCV	Sistema Híbrido	FAN	LAB
OPERAÇÃO PARA O SISTEMA	✓	✓	✓		✓
ENERGIA		✓	✓		✓
LODO				✓	✓
CONCERTO DE EQUIPAMENTOS		✓	✓		✓

#### 4.5.1 Consumo energético

O consumo energético das motobombas e aeradores mecânicos foi obtido a partir da multiplicação entre a potência dos equipamentos, o tempo de funcionamento e a tarifa de energia elétrica. Também foram considerados no cálculo os impostos cobrados sobre a tarifa, quais foram: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), Programa de Integração Social (PIS) e Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PASEP).

Para operação do WCV foram quantificadas duas bombas (conforme Tabela 15 são 3 unidades adquiridas, porém a terceira unidade é para reserva), cada uma com 0,73 kW (equivalente a 0,98 HP). Considerando a vazão afluyente ao sistema, o fluxo hidráulico ( $4 \text{ L.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ) e um intervalo entre pulsos de alimentação de 4 horas (VON SPERLING; SEZERINO, 2018), estimou-se um tempo de funcionamento da bomba de 20,63 minutos por dia. Os mesmos parâmetros foram adotados para cálculo do consumo energético do sistema híbrido, tendo em vista que este possui o mesmo conjunto de motobombas do WCV.

No caso do LAB, devem ser considerados para determinar o gasto energético as três bombas hidráulicas em operação e um aerador submersível. A potência de cada bomba é de 0,73 kW, do aerador de 1,10 kW (1,5 CV) e o tempo de funcionamento de cada equipamento foi adotado conforme a duração dos ciclos (Tabela 7).

Na Tabela 19 são apresentados os valores utilizados para a determinação do consumo energético do WCV e sistema híbrido, e na Tabela 20, para o LAB. Com exceção do ICMS, os demais impostos variam mensalmente. Dessa forma, foram utilizadas alíquotas de COFINS e PIS/PASEP referentes ao mês de julho de 2019, divulgadas pela CELESC (2019), correspondente a 7,07% e 1,54%, respectivamente. O ICMS cobrado sobre a energia, varia de acordo com o consumo. Para consumos acima de 150 kWh o imposto é de 25%.

Assim, considerando o número total de equipamentos elétricos em operação (isto é, excluído as unidades reservas) para cada tecnologia, o gasto mensal com energia para o WCV e Sistema Híbrido foi calculado em R\$ 9,47 mês<sup>-1</sup> para cada sistema, enquanto que para o LAB esse valor foi de R\$ 280,02 mês<sup>-1</sup>.

Tabela 19 - Consumo de energia para operação do WCV e Sistema Híbrido.

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Potência da bomba hidráulica (por unidade)	0,73	kW
Tempo de funcionamento	0,34	h.d <sup>-1</sup>
Número de bombas hidráulicas em operação	2	unidades
Consumo energético total	0,50	kWh.d <sup>-1</sup>
Tarifa de energia	0,47	R\$.kWh <sup>-1</sup>
Tributos sobre tarifa	33,61%	-
<b>Custo total com energia para o WCV</b>	<b>9,47</b>	<b>R\$.mês<sup>-1</sup></b>
<b>Custo total com energia para o Sistema Híbrido</b>	<b>9,47</b>	<b>R\$.mês<sup>-1</sup></b>

\*Valores de tarifa e tributos referentes a julho de 2019.

Tabela 20 - Consumo de energia para operação do LAB.

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Potência do aerador submersível	2,04	kW
Tempo de funcionamento do aerador	5,5	h.d <sup>-1</sup>
Potência da bomba hidráulica (por unidade)	0,73	kW
Tempo de funcionamento da bomba hidráulica para alimentação	3,50	h.d <sup>-1</sup>
Tempo de funcionamento da bomba hidráulica para retirada do efluente	1,00	h.d <sup>-1</sup>
Tempo de funcionamento da bomba hidráulica para retirada do lodo	0,50	h.d <sup>-1</sup>
Consumo energético total	14,87	kWh.d <sup>-1</sup>
Tarifa de energia	0,47	R\$.kWh <sup>-1</sup>
Tributos sobre tarifa	33,61%	-
<b>Custo total com energia para o LAB</b>	<b>280,02</b>	<b>R\$.mês<sup>-1</sup></b>

\*Valores de tarifa e tributos referentes a julho de 2019.

#### 4.5.2 Remoção de lodo excedente das unidades de tratamento FAN e LAB

A limpeza do sistema foi orçada em uma empresa prestadora desse serviço com base no volume útil do reator (15,6 m<sup>3</sup>) e considerando uma periodicidade a cada 6 meses (ANDRADE NETO, 1997; CAMPOS, 1999). Ressalta-se que o custo do serviço corresponde a sucção do lodo líquido do filtro e aspersão de água, em contra fluxo, sobre o leito, como recomenda a literatura.

O custo para remoção do lodo produzido pelo sistema de LAB também foi orçado em uma empresa prestadora desse serviço, tomando como base o volume de lodo adensado armazenado no reservatório, equivalente a 3,91 m<sup>3</sup> (seção 4.3) e frequência de remoção mensal.

Na Tabela 21 são apresentados os custos de limpeza, relacionados a remoção do lodo para o FAN e LAB. É importante ressaltar que se desconsiderou nesta quantificação o lodo produzido no tratamento primário, tendo em vista que todas as tecnologias analisadas nesse estudo procedem um tanque séptico.

Tabela 21 - Custos com remoção de lodo nas unidades FAN e LAB.

PARAMETRO / TECNOLOGIA	FAN	LAB
Periodicidade de limpeza	Semestral	Mensal
Custo por limpeza	R\$ 1.000,00	R\$ 420,00

#### 4.5.3 Operador para o sistema e conserto de equipamentos

O FAN possui operação e manutenção muito simples, sendo necessário apenas proceder, periodicamente, com a remoção do excesso de lodo do meio filtrante (ABNT, 1997; CAMPOS, 1999). Por isso, não foi considerando no levantamento de OPEX a necessidade de um operador para o sistema.

Os WC exigem controle e manutenção operacional pouco frequente (KADLEC; WALLACE, 2009), no entanto, ainda assim é necessária operação por pessoa treinada com habilidades básicas (HOFFMANN *et al.*, 2011). As tarefas operacionais incluem: o monitoramento do nível de líquido na entrada e saída, a desobstrução das tubulações de distribuição, o controle de pragas e vegetações invasoras e o corte das macrófitas (VYMAZAL; KREPFELOVÁ, 2008; KADLEC; WALLACE, 2009; HOFFMANN *et al.*, 2011; FECHINE, 2019). Sistemas com WCV exigem mais operação e manutenção do que WCH (HOFFMANN *et al.*, 2011), relacionado principalmente com a verificação regular e eventuais consertos das bombas hidráulicas de alimentação dos sistemas.

Segundo EPA (1993) a operação e manutenção dos WC requerer trabalho periódico, e não contínuo, no local. É recomendado, ao menos, a verificação mensal (EPA, 1993; COOPER; GRIFFIN; COOPER, 2005), embora algumas atividades como controle de pragas e corte da vegetação, exijam intervalos menos frequentes (KADLEC; WALLACE, 2009). Nesse

contexto, considerou-se para a operação e manutenção dos WC um operador com frequência mensal para o WCH e quinzenal para o WCV e sistema híbrido.

Devido principalmente à necessidade de automação, o LAB é uma tecnologia que requer manutenção regular, com intervalos menores do que outros processos, tais como o FAN e WC. A ABNT (1997) classifica a operação do LAB como simples, porém com custo operacional alto e manutenção com certo grau de complexidade. As atividades operacionais estão associadas, além da remoção do lodo, a desobstrução do equipamento de aeração e a verificação do funcionamento da automação do sistema e equipamentos mecânicos. A frequência do operador para o sistema de LAB foi estabelecida em duas vezes por semana, definida com base em pesquisa realizada em empresa prestadora desse tipo de serviço.

Assim, para compor os custos de operador para os sistemas, considerou-se que as atividades de operação ocorrem em meio período (4 horas) por dia de monitoramento, e o valor da hora do operador foi definida pelo SINAPI com base no custo da hora de um auxiliar técnico de engenharia (R\$ 23,17 h<sup>-1</sup>). Dessa forma, o custo do dia de operação é de R\$ 92,68.

Além dos custos com operador, também foram considerados os gastos com reparos dos equipamentos mecânicos. Segundo Van Haandel e Van Der Lubbe (2012) a manutenção desses equipamentos representa de 1 a 2,5%, ao ano, do custo total do investimento. Na Tabela 22 e Tabela 23 são apresentados os valores que compõem o OPEX relacionados ao operador do sistema e conserto de equipamentos, respectivamente.

Tabela 22 - Custo mensal com operador para os sistemas estudados, exceto FAN.

TECNOLOGIA	FREQUÊNCIA	CUSTO DA HORA DO OPERADOR*	DURAÇÃO DO MONITORAMENTO	CUSTO MENSAL
WCH	Mensal	R\$23,17	4 horas/dia de monitoramento	R\$ 92,68
WCV	Quinzenal			R\$ 185,36
Sistema híbrido	Quinzenal			R\$ 185,36
LAB	2x por semana			R\$ 741,44

\* O valor da hora do operador foi definido pelo SINAPI com base no custo da hora de um auxiliar técnico de engenharia.

Tabela 23 - Custo anual com conserto de equipamentos para WCV, sistema híbrido e LAB.

TECNOLOGIA	CUSTO ANUAL	
WCV	2,5%, ao ano, do custo de aquisição*	R\$ 173,61
Sistema híbrido		R\$ 173,61
LAB		R\$ 457,73

\* Segundo Van Haandel e Van Der Lubbe (2012).

#### 4.6 EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO

A eficiência de remoção de poluentes de sistemas de tratamento depende de diversos fatores, tais como: carga hidráulica e orgânica aplicada aos reatores, condições de operação, grau de manutenção, dimensionamento e projeto, construção, temperatura, geometria, durações dos ciclos operacionais (para o LAB), entre outros. Por isso, as eficiências podem divergir até mesmo entre uma mesma tecnologia. Uma pesquisa por eficiências de tratamento obtidas pelas tecnologias em análise neste estudo foi realizada.

Na literatura, são relatados principalmente as eficiências de uma parte do arranjo tecnológico, não se referindo a eficiência global. Por isso, na apresentação da Tabela 24 são apresentadas eficiências de remoção referentes ao conjunto do arranjo tecnológico (eficiência global), e na Tabela 25 apenas os resultados obtidos para as tecnologias responsáveis pela segunda etapa do tratamento, após o TS.

Como pode ser observado na Tabela 24, o conjunto TS+FAN é responsável pelas menores eficiências de tratamento. Segundo Andrade Neto (1997), a combinação do TS com outros processos anaeróbios não apresenta alta eficiência, principalmente na remoção de patógenos, mas produz efluente razoável, que pode ser mais facilmente encaminhado ao destino final. Ainda segundo o autor, a remoção de nutrientes não é significativa em sistemas TS+FAN, e a remoção de coliformes fecais é muito pobre.

No caso do WCH, apesar do mesmo ser constituído predominantemente em processos anaeróbios, são relatados como muito eficientes na remoção de matéria orgânica e sólidos em suspensão. A remoção de nutrientes é um processo complexo e variável, no entanto, as plantas e microrganismos presentes no meio filtrante apresentam certa capacidade de remoção desses poluentes (MOREL; DIENER, 2006). Por isso, os WCH podem apresentar eficiências superiores aos FAN.

Em Santa Catarina (SC), os parâmetros de lançamento de efluentes em corpos hídricos são indicados pela resolução nº 430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2011) e lei estadual de Santa Catarina nº 14.675 (SANTA CATARINA, 2009). De modo geral, os limites estipulados não são tão rigorosos, sendo exigida concentração de 60 mg/L ou remoção mínima em termos de carga de 80% para DBO. Com relação aos padrões de nutrientes, é estabelecido limite para o fósforo total (4 mg/L ou remoção mínima de 75%) apenas para lançamento em lagoas, lagunas ou estuários. Os limites para nitrogênio amoniacal exigidos pela resolução CONAMA nº 430 estão suspensos.

Assim, pode-se pressupor que, de modo geral, o arranjo tecnológico de TS+FAN, apesar de não apresentar elevada eficiência de tratamento é passível de aprovação, com base nas exigências para SC. No entanto, para estados com limites mais restritivos, lançamentos em redes de drenagem, ou até mesmo para áreas mais sensíveis (como é o caso da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição<sup>1</sup> em Florianópolis), esse arranjo tecnológico pode não ser suficiente para atingir as exigências, sendo necessária a adoção de tratamento complementar. Em contrapartida, as demais tecnologias analisadas, se bem projetadas, construídas e operadas, podem atingir elevadas eficiências de remoção de poluentes (HOFFMANN *et al.*, 2011; MOREL; DIENER, 2006; ABNT, 1997), inclusive nutrientes, e exceder as exigências legais.

---

<sup>1</sup> A Bacia da Lagoa da Conceição em Florianópolis/SC foi alvo de uma ação civil pública (ACP nº 2000.72.00.004772-2) por apresentar construções em áreas de preservação permanente. Atualmente, a Vigilância Sanitária do município sugere como tratamento de efluentes domésticos para imóveis e empreendimentos que estejam localizados nessa área da sentença judicial um arranjo composto por tanque séptico, filtro anaeróbio, filtro aeróbio e infiltração no solo após desinfecção. Ademais, também é exigida a apresentação de 3 laudos laboratoriais de arranjos tecnológicos similares ao que deverá ser implantado, contemplando os parâmetros solicitados na sentença e comprovando a eficiência do sistema.



Tabela 24 - Eficiências globais de tratamento para o arranjo tecnológico compreendido por tanque séptico seguido de pós tratamento com as unidades estudadas.

ARRANJO TECNOLÓGICO	DBO	DQO	SST	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NT	PT	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	COLIFORMES TOTAIS	<i>E. coli</i>	FONTE
TS + FAN	70-90%	-	-	-	10-25%	10-20%	-	60-90%	-	Von Sperling (1996)
	40-75%	40-70%	>70%	-	-	-	20-50%	-	-	ABNT (1997)
	80-85%	70-80%	80-90%	<45%	<60%	<35%	-	-	-	Florencio, Bastos e Aisse (2006)
	85%	83%	92%	21%	-	40%	-	-	-	Oliveira (1983)
	67%	73%	93%	-	-	-	-	-	-	Ávila (2005)
TS + LAB	67%	-	90%	-	-	-	-	-	-	Andrade Neto (1997)
	70-95%	60-90%	90-100%	60-90%	-	-	50-90%	-	-	ABNT (1997)
TS + WCH	-	83%	90,5%	16,3%	-	-	50,5%	2 unid. log	2 unid. log	FUNASA (2013)
	-	>80%	>85%	<40%	<50%	<20%	-	1 a 3 unid. log	-	Von Sperling e Sezerino (2018)
	-	>80%	>80%	20-30%	30-50%	10-20%	-	2 unid. log	-	Dotro <i>et al.</i> (2017)
	>85%	>80%	>85%	<30%	<50%	<20%	-	-	1 a 3 unid. log	Santos (2019)
	69%	71%	38%	-	78%	72%	-	-	-	Philippi, Costa e Sezerino (1999)
TS + WCV	89%	91%	96%	70%	45%	-	70%	1,52 unid. log	1,65 unid. log	Estação experimental GESAD
	-	>80%	>85%	>85%	<40%	<20%	-	1 a 2 unid. log	-	Von Sperling e Sezerino (2018)
	-	>90%	>90%	>90%	<20%	10-20%	-	2 a 4 unid. log	-	Dotro <i>et al.</i> (2017)
	>85%	>80%	>85%	>85%	<20%	<20%	-	-	1 a 3 unid. log	Santos (2019)
	88%	75%	83%	47%	-	-	63%	-	-	Trein <i>et al.</i> (2015)
TS + SH	93%	97%	100%	94%	83%	-	95%	3,07 unid. log	5,16 unid. log	Estação experimental GESAD
	84%	77%	95%	51%	54%	35%	-	1,76 unid. log	1,83 unid. log	Vera, Martel e Márquez (2010)
	70%	71%	87%	55%	-	-	17%	-	-	Serrano <i>et al.</i> (2011)
	-	91%	94%	-	65%	52%	-	-	-	Rousseau, Vanrolleghem e Pauw (2004)
	81%	78%	80%	-	-	-	-	1,98 unid. log	2,12 unid. log	Abidi <i>et al.</i> (2009)
91%	-	45%	77%	63%	89%	93%	-	-	Öövel <i>et al.</i> (2007)	

Tabela 25 - Eficiências de tratamento relativa às tecnologias estudadas pós TS.

TECNOLOGIA	DBO	DQO	SST	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NT	PT	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	COLIFORMES TOTAIS	<i>E.coli</i>	FONTE
LAB	85-95%	-	-	-	30-40%	30-45%	-	60-90%	-	Von Sperling (1996)
	93-98%	90-95%	85-95%	90-95%	15-25%	10-20%	-	70-95%	-	Von Sperling (2016)*
	-	90%	85%	90%	88%	-	-	-	-	Cybis, Santos e Gehling (2003)
	-	95%	-	99%	86%	88%	99%			Sytek-Szmeichel e Zubrowska-Sudol (2016)
	81%	82%	87%	81%	-	-	0%	1,98	-	Ng <i>et al</i> (1993)
	99%	96%	-	99%	88%	98%	-	-	-	Steinmetz, Wiese e Schmitt (2002)
	81%	63%	68%	21%	39%	41%	-	-	-	Vymazal e Krepfelová (2008)
WCH	85%	87%	61%	29%	-	58%	-	-	-	Pandey <i>et al</i> (2006) apud Vymazal Krepfelová (2008)
	84%	83%	90%	16%	-	-	51%	-	-	Sezerino <i>et al.</i> (2012)
	-	83%	80%	23%	-	-	63%	-	1,16 unid. log	Sezerino <i>et al.</i> (2015b)
	-	83%	90%	17%	-	-	53%	-	2,66 unid. log	Sezerino <i>et al.</i> (2015b)
	-	73%	-	55%	-	-	59%	-	1,40 unid. log	Sezerino <i>et al.</i> (2015b)
	-	89%	82%	50%	-	-	-	-	3,46 unid. log	Sezerino <i>et al.</i> (2015b)
	75%	-	75%	39%	43%	50%	-	-	-	Vymazal (2010)
	-	72%	86%	-	33%	48%	-	-	-	Rousseau, Vanrolleghem e Pauw (2004)
	62%	71%	91%	22%	23%	43%	46%	-	98%	Mota e Von Sperling (2009)
	80-90%	-	80-95%	-	15-40%	30-45%	-	-	-	Morel and Diener (2006)
WCV	90%	-	89%	73%	43%	56%	-	-	-	Vymazal (2010)
	-	94%	98%	-	52%	70%	-	-	-	Rousseau, Vanrolleghem e Pauw (2004)
	75-95%	-	65-85%	-	<60%	<35%	-	-	-	Morel and Diener (2006)

\*Para lodo ativado de aeração prolongada.

## 4.7 ACEITAÇÃO DO PÚBLICO COMO ASPECTO SOCIAL

### 4.7.1 Características gerais da tecnologia de tratamento e do efluente final

As características gerais das tecnologias e do efluente final foram avaliadas com base na presença de odor e cor no efluente final, na possibilidade de geração de ruído no processo de tratamento, no impacto visual que a tecnologia pode proporcionar ao meio, na presença de animais e vetores atraídos pelas tecnologias, no potencial de aproveitamento dos subprodutos gerados e na resiliência para absorver variações de carga afluente ao sistema.

#### Odor e cor

Segundo Hoffmann *et al.* (2011), o efluente de qualquer processo biológico de tratamento de águas residuárias, como wetlands construídos, pode ter uma cor amarelada ou acastanhada, causada por substâncias húmicas. Ainda segundo os autores, não é sempre que essa coloração aparece. Para Santos (2019) o efluente final após tratamento por WC é bastante clarificado. Característica essa observada também no efluente final da estação experimental de wetlands construídos do GESAD, ao longo de 4 anos de operação. Quanto ao odor em WC, EPA (2004a) e Hoffmann *et al.* (2011) afirmam que esses são ausentes.

Em processo de LAB, o efluente final também se apresenta sem coloração e odor (ABNT, 1997), ao contrário do efluente final do FAN, que segundo a ABNT (1997) e Chernicharo (2001) tem a possibilidade de gerar cor e maus odores, apresentando um efluente final com aspecto desagradável, principalmente quando há finalidade de reuso.

#### Ruído

O ruído está associado a operação dos equipamentos mecânicos. Por isso, para o FAN e WCH essa característica é inexistente, enquanto nos WCV e LAB, o ruído existe, apesar de baixo. No caso do LAB, supõe-se que esse impacto seja maior que no WCV, uma vez que aquele requer uma quantidade maior de bombas hidráulicas acionadas por mais tempo, além de um aerador mecânico.

#### Impacto visual

Com relação ao impacto visual, o FAN e LAB são tecnologias frequentemente instaladas abaixo do nível do terreno (enterradas), e por isso, não causam nenhum impacto

visual. Diferentemente, os WC apresentam como uma de suas vantagens o apelo estético proporcionado. Segundo EPA (1995), os WC podem ser construídos para se encaixar harmoniosamente na paisagem e são uma abordagem ambientalmente sensível que é vista com bons olhos pelo público em geral.

#### **Presença de animais e vetores**

Quanto a presença de animais e vetores, o fato dos WC fornecerem um habitat da vida selvagem (VYMAZAL, 2010) faz com que esses sistemas possam atrair alguns animais (EPA, 1995), como anfíbios, répteis, pássaros e mamíferos (EPA, 1999; KADLEC; WALLACE, 2009). Ao mesmo tempo que alguns animais são apreciáveis por pessoas, como os pássaros, outros podem não ser muito desejáveis, como os lagartos e sapos. De modo geral, a presença desse tipo de animais não é observada no FAN e LAB. Por outro lado, a presença de vetores, como baratas, é muito comum em reatores enterrados do tipo FAN e LAB.

#### **Potencial de aproveitamento de subprodutos**

Nos WC pode-se citar como subproduto da operação a biomassa produzida a partir do corte das macrófitas. Esse subproduto pode ser utilizado pelo homem para fins econômicos (KADLEC; WALLACE, 2009), entre eles: na produção de ração animal, fertilizante para solo e tanque de piscicultura, nas industriais e construção civil (CORAUCCI FILHO *et al.*, 2001).

Para o FAN, em função do lodo de processos anaeróbios ser estabilizado (CHERNICHARO, 1997), esse apresenta maior possibilidade de ser utilizado como condicionador de solos. No entanto, de modo geral, o lodo gerado no FAN e LAB dificilmente apresentam potencial para aproveitamento, sobretudo em função das rigorosas legislações para essa finalidade.

#### **Resiliência para absorver variações de cargas**

Como são sistemas robustos, os WC são mais tolerantes as flutuações nas concentrações do afluente e, por isso, apresentam boa capacidade para absorver tais variações (IWA, 2000; VON SPERLING, 2007b; DOTRO *et al.*, 2017; SCHROEDER; WALZBURIECH; SEZERINO, 2019).

Para Chernicharo (2001), os processos anaeróbios toleram elevadas cargas orgânicas. Ademais, por serem reatores com fluxo através de lodo ativo e biomassa aderida a suporte fixo, os filtros anaeróbios são mais estáveis e menos dependentes das variações do afluente

(CHERNICHARO, 1997). Von Sperling (2007b) também cita que o conjunto TS+FAN apresenta boa resistência a variações de cargas.

Em sistemas de LAB há uma grande vantagem que é a flexibilidade operacional, através da variação do ciclo operacional. Dessa forma, a duração usual de cada estágio do ciclo pode ser alterada em função das variações do fluxo influente e das características do esgoto (VON SPERLING, 2007a).

Essas informações coletadas da literatura, referentes as características do tratamento e do efluente final de cada tecnologia estudada, foram compiladas no Quadro 1, e a partir desse, foi atribuída uma classificação conceitual (definida em uma escala crescente de não preferível, aceitável e preferível) que representasse, como um todo, este parâmetro qualitativo (característica do tratamento e efluente final). Para definir a classificação conceitual, tomou-se como base a quantidade de características positivas e negativas para cada alternativa.

É importante ressaltar que essa classificação é um tanto quanto subjetiva, uma vez que diferentes tomadores de decisão podem classificá-las de modo diferente. No entanto, foi adotada e utilizada para facilitar a comparação entre as tecnologias a partir de características qualitativas.

Quadro 1 – Características gerais das tecnologias de tratamento e efluente final para as tecnologias estudadas.

CARACTERÍSTICAS	FAN	LAB	WCH	WCV	SH
Presença de odor e cor no efluente final	Efluente final apresenta cor e odor	Efluente final clarificado e sem odor	Efluente final sem odor e geralmente clarificado (porém, em alguns casos, pode apresentar coloração amarelada)	Efluente final sem odor e geralmente clarificado (porém, em alguns casos, pode apresentar coloração amarelada)	Efluente final sem odor e geralmente clarificado (porém, em alguns casos, pode apresentar coloração amarelada)
Emissão de ruído	Não gera ruídos	Gera ruído na operação (3 bombas hidráulicas e 1 aerador)	Não gera ruídos	Gera ruído na operação (2 bombas hidráulicas)	Gera ruído na operação (2 bombas hidráulicas)
Impacto visual	Não apresenta impacto visual em unidades enterradas	Não apresenta impacto visual em unidades enterradas	Impacto visual positivo pelo embelezamento paisagístico	Impacto visual positivo pelo embelezamento paisagístico	Impacto visual positivo pelo embelezamento paisagístico
Presença de animais e vetores	Não atrai animais. Pode atrair vetores	Não atrai animais. Pode atrair vetores	Pode atrair animais	Pode atrair animais	Pode atrair animais
Potencial de aproveitamento de subprodutos	Não há potencial para aproveitamento do lodo gerado	Não há potencial para aproveitamento do lodo gerado	Biomassa das macrófitas com potencial para aproveitamento com fins econômicos	Biomassa das macrófitas com potencial para aproveitamento com fins econômicos	Biomassa das macrófitas com potencial para aproveitamento com fins econômicos
Resiliência para absorver variações de cargas	Tolerantes a variação das concentrações afluentes	Flexibilidade operacional conforme variações das concentrações afluentes	Tolerantes a variação das concentrações afluentes	Tolerantes a variação das concentrações afluentes	Tolerantes a variação das concentrações afluentes
<b>CARACTERÍSTICA DO TRATAMENTO E EFLUENTE FINAL</b>	<b>NÃO PREFERÍVEL</b>	<b>NÃO PREFERÍVEL</b>	<b>PREFERÍVEL</b>	<b>ACEITÁVEL</b>	<b>ACEITÁVEL</b>

OBS: Células em verdes representam características positivas, em laranja, negativas e cinzas são imparciais.

#### 4.7.2 Complexidade de construção e operação

Com base nas características já mencionadas nas seções 4.4 e 4.5 sobre a construção e operação das tecnologias, a classificação da complexidade dessas atividades pode ser atribuída conforme apresentado no Quadro 2.

É importante esclarecer que a subjetividade é algo vinculado à definição da classificação de complexidade de operação e construção apresentada no Quadro 2. Essa classificação tomou como base a comparação entre as cinco tecnologias avaliadas neste estudo.

Em comparações com outras tecnologias, tal classificação pode ser alterada. Por exemplo, diversos autores (VON SPERLING, 2007b; KADLEC; WALLACE, 2009; HOFFMANN *et al.*, 2011; DOTRO *et al.*, 2017; SANTOS, 2019) citam os WC como tecnologias com operação muito simples, e de fato são, porém, quando comparado ao FAN, este último apresenta um nível de operação ainda inferior.

Por outro lado, mesmo considerando tal subjetividade, não há como contestar que há um elevado nível de complexidade na operação e manutenção do LAB. Segundo EPA (1999), como o sistema de automação é uma das partes principais da operação do LAB, esses sistemas podem exigir mais manutenção do que um sistema convencional de lodo ativado. Um nível maior de sofisticação na automação geralmente equivale a mais itens que podem falhar ou exigir manutenção, por isso a operação é tão complexa.

Quadro 2 - Complexidade de construção e operação para as tecnologias estudadas.

TECNOLOGIA	CONSTRUÇÃO		OPERAÇÃO		CLASSIFICAÇÃO GERAL
	CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	
FAN	Simple	Construção da estrutura em alvenaria, instalação das tubulações e disposição do material filtrante.	Muito simples	Remoção de lodo (semestral).	SIMPLES
LAB	Complexa	Construção da estrutura em alvenaria, instalação e automação dos equipamentos mecânicos.	Complexa	Remoção de lodo (mensal), eventual desobstrução do equipamento de aeração, verificação da duração das fases do ciclo operacional, controle do sistema de automação e conserto de equipamentos.	COMPLEXA
WCH	Simple	Escavação, colocação da manta PEAD, instalação das tubulações, distribuição do material filtrante e plantio das macrófitas.	Simple	Verificação e controle da operação do sistema (envolvendo atividades eventuais de desobstrução das tubulações, controle de pragas e invasoras, corte das macrófitas).	SIMPLES
WCV	Intermediária	Escavação, colocação da manta PEAD, instalação das tubulações, distribuição do material filtrante, plantio das macrófitas e instalação das motobombas.	Intermediária	Verificação e controle da operação do sistema (envolvendo atividades eventuais de desobstrução das tubulações, controle de pragas e invasoras, corte das macrófitas), troca de registros para intermitência de unidades e conserto de motobombas.	INTERMEDIÁRIA
SH	Intermediária	Escavação, colocação da manta PEAD, instalação das tubulações, distribuição do material filtrante, plantio das macrófitas e instalação das motobombas	Intermediária	Verificação e controle da operação do sistema (envolvendo atividades eventuais de desobstrução das tubulações, controle de pragas e invasoras, corte das macrófitas), troca de registros para intermitência de unidades e conserto de motobombas.	INTERMEDIÁRIA



#### 4.8 RESUMO DO CAPEX E OPEX DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

No Quadro 3 apresenta-se um compilado dos custos relacionados à construção e operação para cada tecnologia. Observa-se a partir dos resultados de CAPEX que apesar da percepção geral ser de que os wetlands construídos são tecnologias com baixo custo de construção (IWA, 2000; STEFANAKIS; AKRATOS; TSIHRINTZIS, 2014), neste estudo e para esta escala de aplicação, constatou-se que o WCH apresentou CAPEX semelhante ao LAB, sendo que o WCV e SH apresentaram custos ainda mais elevados. É importante destacar que a área requerida para a construção do WCH e WCV é mais de 24 vezes maior do que o necessário para a construção do FAN e LAB. Por isso, esse alto valor para o WC está atrelado ao elevado requisito de área construtiva e, conseqüentemente, a grande quantidade de materiais necessários. Observa-se, portanto, na composição do CAPEX para os WC o elevado custo com materiais e maquinários, principalmente quando comparado ao FAN e LAB que requerem pouca área.

É importante lembrar que neste estudo foi considerada a concepção de apenas um tanque reator para o LAB, como já mencionado anteriormente. Apesar dessa configuração ser a mais comum em estações de tratamento descentralizada para condomínios e loteamentos, a concepção com dois reatores apresenta maior folga operacional. Por isso, fez-se o levantamento do CAPEX para um LAB no mesmo cenário, porém com dois reatores. Os valores mostraram que o aumento mais expressivo dos custos é atribuído aos equipamentos (no cenário de dois reatores foram considerados 2 aeradores e 6 bombas submersíveis). Nesse novo contexto o CAPEX para o LAB foi de R\$ 65.629,63, e desta forma, essa tecnologia passa ter um dos maiores valores para implantação, ficando atrás apenas do sistema híbrido.

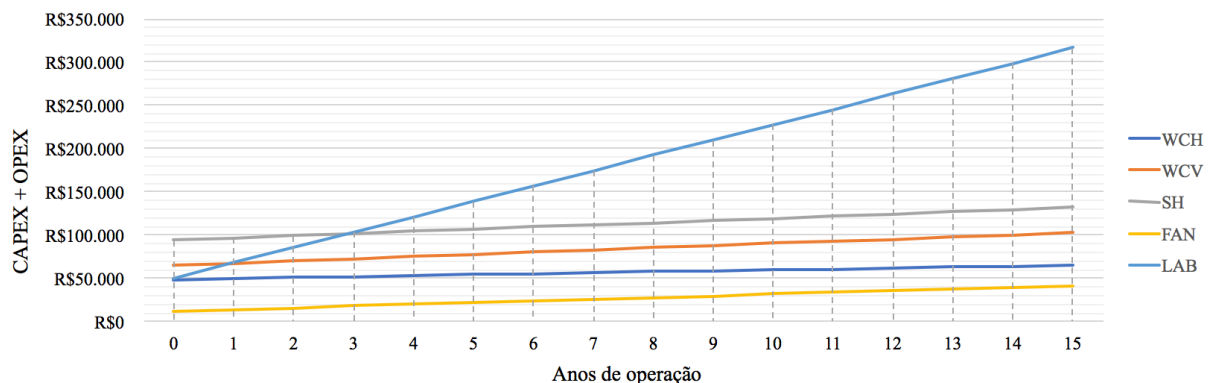
Também para fins comparativos, foram orçadas estações de tratamento de efluente (ETE) compactas por lodo ativado vendidas por empresas especializadas. No total, foram realizados 3 orçamentos de ETE para a escala de aplicação deste estudo, e os valores para implantação foram de R\$ 58.732,00, R\$ 66.450,00 e R\$ 83.550,00. Ressalta-se que nesses orçamentos estão inclusos caixa gradeada, sistema de desinfecção, projeto, anotação de responsabilidade técnica (ART) e, ainda, para a proposta de valor mais elevado, um filtro de carvão ativado para controle de odores e treinamento operacional. Assim, considerando que esses itens não foram levantados no CAPEX para este estudo, conclui-se que os valores se apresentam semelhantes aos custos de mercado.

Ainda sobre o CAPEX, a literatura apresenta custos por habitante da ordem de 50 a 80 US\$ para o LAB e 30 a 80 US\$ para o FAN, sendo que para esse último estão inclusos os custos do TS (VON SPERLING, 2014). Para o WC os valores variam bastante, sendo mencionado por Von Sperling (2007b) custos de implantação entre 20 a 30 US\$.hab<sup>-1</sup>, enquanto que em um estudo de Platzer *et al.* (2002) apud Vymazal e Krepfelová (2008) encontrou-se valores entre 34 a 103 US\$.hab<sup>-1</sup>. Já experiências da International Water Association – IWA, apontam para o custo médio de construção dos WC na ordem de 388,00 US\$.hab<sup>-1</sup> (IWA, 2000).

De modo geral, segundo Vymazal (2010) e Dotro *et al.* (2017), os custos de capital de wetlands construídos com fluxo subsuperficial são praticamente os mesmos de sistemas de tratamento convencionais. Embora isso não pareça muito convincente à primeira vista, a principal vantagem econômica que os WC oferecem é o custo significativamente reduzido de operação e manutenção, em comparação com as tecnologias de tratamento convencional (VYMAZAL, 2010; STEFANAKIS; AKRATOS; TSIHRINTZIS, 2014).

Por isso, de acordo com Hoffmann *et al.* (2011), as decisões financeiras sobre os processos de tratamento não devem ser tomadas considerando apenas os custos de construção, mas sim os valores totais despendidos durante a vida útil de projeto, o que inclui também os custos anuais de operação e manutenção. Assim, para essa consideração apresenta-se na Figura 15 o somatório dos valores de CAPEX e OPEX anuais ao longo do horizonte de projeto de 15 anos (vida útil), desconsiderando qualquer avaliação econômica mais aprofundada, isto é, sem considerar a depreciação monetária ao longo do tempo e a incidência de impostos.

Figura 15 - Valores de CAPEX + OPEX para as tecnologias estudadas e empregadas no tratamento de esgoto de um equivalente populacional de 150 pessoas, sob horizonte de projeto de 15 anos.



Analisando os valores de CAPEX + OPEX ao longo da vida útil dos sistemas, observa-se que apesar do LAB apresentar inicialmente custos de CAPEX semelhantes ao WCH, e

inferiores ao WCV e SH, antes do primeiro ano os custos totais passam a ser maiores do que para o WCV, sendo que no terceiro ano esse valor para o LAB supera o SH, passando a ser a tecnologia com as maiores despesas totais. Ao final dos 15 anos, a soma do CAPEX e OPEX resulta para o LAB um montante de 7,5 vezes maior do que esses mesmos custos para o FAN, a tecnologia mais barata para construção. Na comparação do LAB com as demais modalidades de WC, ao final da vida útil dos sistemas, o LAB apresenta uma despesa cerca de 4,8, 3,1 e 2,4 vezes maior do que o WCH, WCV e SH, respectivamente.

Quadro 3 - CAPEX e OPEX levantados para as tecnologias estudadas e empregadas para o tratamento de esgoto de uma comunidade com um equivalente populacional de 150 pessoas, sob um horizonte de projeto de 15 anos.

ITENS PARA LEVANTAMENTO DE CUSTOS		WCH	WCV	SH	FAN	LAB	
CONSTRUÇÃO (CAPEX)	Materiais	Tubulações e acessórios para conexão	R\$ 503,06	R\$ 5.703,04	R\$ 5.918,68	R\$ 355,17	Não se aplica
		Material filtrante	R\$ 23.338,81	R\$18.753,53	R\$ 30.858,12	R\$ 1.063,61	Não se aplica
		Plantas	R\$ 7.560,00	R\$ 7.560,00	R\$ 13.410,00	Não se aplica	Não se aplica
		Manta PEAD	R\$ 7.439,28	R\$ 7.622,76	R\$ 12.459,96	Não se aplica	Não se aplica
		Tijolos, argamassa com impermeabilizante, concreto, pedra britada e aço.	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	R\$ 5.766,82	R\$ 7.235,72
		Reservatório	Não se aplica	R\$ 154,94	R\$ 154,94	Não se aplica	R\$ 5.144,65
	Equipamentos	Bombas submersíveis	Não se aplica	R\$ 6.944,46	R\$ 6.944,46	Não se aplica	R\$ 9.259,28
		Aerador Mecânico	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	R\$ 9.050,00
	Maquinário	Retroescavadeira	R\$ 5.165,06	R\$ 4.621,37	R\$ 7.356,00	R\$ 406,68	R\$ 640,68
		Betoneira	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	R\$ 196,46	R\$ 343,24
	Serviços	Mão de obra	R\$ 4.842,85	R\$13.538,30	R\$ 16.733,25	R\$ 4.319,52	R\$ 3.435,92
		Instalação de equipamentos	Não se aplica	R\$ 592,41	R\$ 592,41	Não se aplica	R\$ 15.240,72
	<b>CUSTO TOTAL DE CONSTRUÇÃO</b>		<b>R\$ 48.849,06</b>	<b>R\$ 65.490,80</b>	<b>R\$ 94.427,82</b>	<b>R\$ 12.092,77</b>	<b>R\$ 50.350,21</b>
	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (OPEX)	Gasto energético (custo anual)	Não se aplica	R\$ 113,58	R\$ 113,58	Não se aplica	R\$ 3.360,24
Remoção de lodo (custo anual)		Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	R\$ 2.000,00	R\$ 5.040,00	
Operador para o sistema (custo anual)		R\$ 1.112,16	R\$ 2.224,32	R\$ 2.224,32	Não se aplica	R\$ 8.897,28	
Conserto de equipamentos (custo anual)		Não se aplica	R\$ 173,61	R\$ 173,61	Não se aplica	R\$ 457,73	
<b>CUSTO TOTAL DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (anual)</b>		<b>R\$ 1.112,16</b>	<b>R\$ 2.511,51</b>	<b>R\$ 2.511,51</b>	<b>R\$ 2.000,00</b>	<b>R\$ 17.755,25</b>	

OBS.: Não foram considerados custos com terreno, impostos, desinfecção e demais tipos de tratamentos complementares, projeto, anotação de responsabilidade técnica (ART) e análises periódicas de qualidade do efluente.

#### 4.8.1 Discriminação dos custos

Na Figura 16 e Figura 17 são apresentados os pesos percentuais de cada item que compõe o CAPEX e OPEX, respectivamente.

Figura 16 - Discriminação do CAPEX levantado para as tecnologias estudadas e empregadas para o tratamento de esgoto de uma comunidade com um equivalente populacional de 150 pessoas, sob um horizonte de projeto de 15 anos.

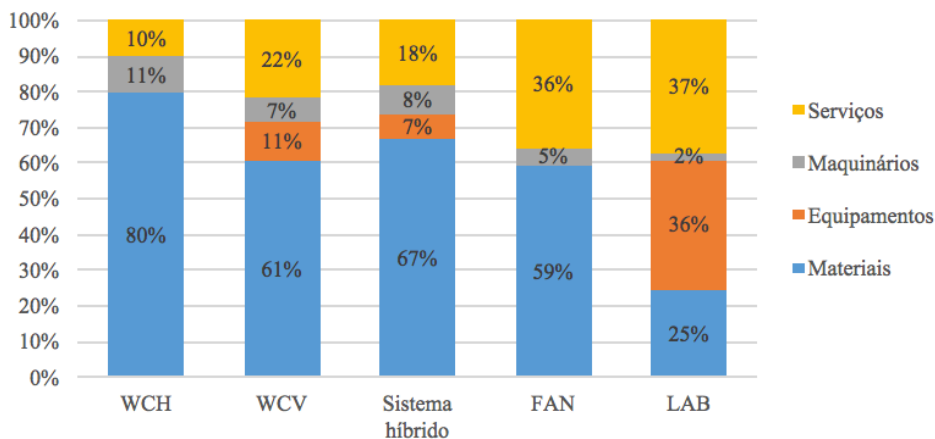
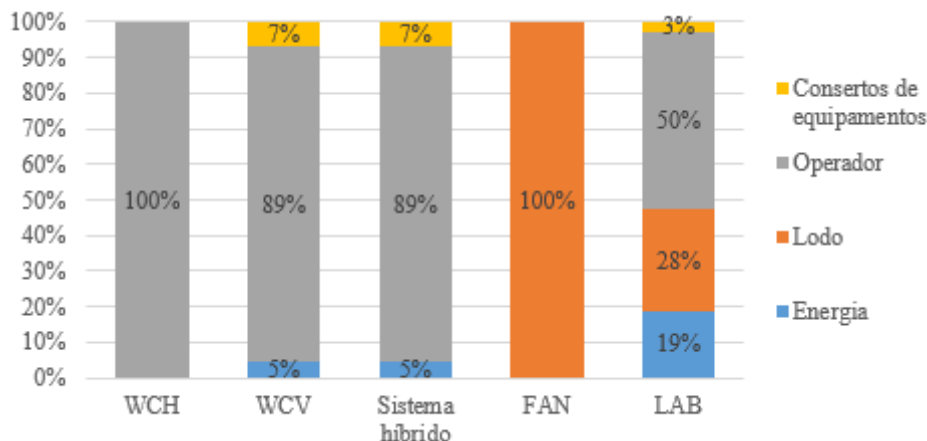


Figura 17 - Discriminação do OPEX levantado para as tecnologias estudadas e empregadas para o tratamento de esgoto de uma comunidade com um equivalente populacional de 150 pessoas, sob um horizonte de projeto de 15 anos.



A análise dos custos discriminados para o CAPEX evidenciou que a compra de materiais representa mais da metade dos custos de implantação de um WC e FAN. Nos WC essa porcentagem para os materiais é ainda maior (acima de 61% do CAPEX) em função da

elevada área superficial, o que conseqüentemente, aumenta a quantidade de materiais necessários para a construção. Para o LAB, em função do elevado nível de sofisticação para automação, os custos mais representativos para o CAPEX estão relacionados aos equipamentos eletromecânicos e aos serviços, que inclui a instalação do sistema de automação. Esses itens juntos somam mais de 70% do CAPEX.

Quanto a discriminação do OPEX, observa-se que apesar dos WC não exigirem monitoramento complexo, apenas uma verificação periódica de seu funcionamento, a necessidade de operador para o sistema corresponde a maior representatividade do OPEX, acima de 89% para qualquer modalidade de WC. Para o WCV e sistema híbrido, também pode-se relacionar uma pequena parcela do OPEX com a energia consumida (5%) e conserto de equipamentos (7%), relativo exclusivamente a necessidade de bombas hidráulicas. É importante destacar que esse equipamento eletromecânico pode ser substituído por um sifão com a finalidade de introduzir alimentação em pulsos ao sistema. Nesse caso, além da redução de 12% e 8% no CAPEX para o WCV e sistema híbrido, respectivamente, também poder-se-ia reduzir em pelo menos 12% o OPEX para ambos os sistemas.

Na análise dos custos discriminados do OPEX também é possível perceber que o LAB apresenta a maior diversidade de serviços necessários para operação e manutenção. Dentre eles, a necessidade de operador para o sistema é responsável pela maior parcela dos custos (50%), seguido pelas despesas com remoção de lodo (28%), energia (19%) e conserto dos equipamentos eletromecânicos (3%).

#### 4.9 RESUMO DOS CRITÉRIOS DE SUSTENTABILIDADE PARA AS TECNOLOGIAS

No Quadro 4 apresenta-se um resumo de todos os critérios de sustentabilidade para cada tecnologia. Vale ressaltar que para avaliar a remoção de nutrientes, foram consideradas as eficiências de redução de nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), uma vez que este parâmetro é destacado na resolução nº 430 do CONAMA (BRASIL, 2011) para lançamento em cursos d'água superficiais, apesar da atual suspensão na avaliação do mesmo.

Para fins de comparação da eficiência de tratamento entre os arranjos tecnológicos, foram adotadas as referências da ABNT (1997) para o FAN e LAB e Von Sperling e Sezerino (2018) para o WCH e WCV, por serem documentos muito consolidados e amplamente difundidos. Para o SH optou-se por adotar a faixa de variação entre as referências pesquisadas (Tabela 24), excluindo quando for o caso, valores muito divergentes dos demais apresentados.

Quadro 4 - Resumo dos critérios de sustentabilidade relacionados às tecnologias estudadas e empregadas para o tratamento de esgoto de um equivalente populacional de 150 habitantes, sob um horizonte de projeto de 15 anos.

<b>CRITÉRIOS DE SUSTENTABILIDADE</b>	<b>WCH</b>	<b>WCV</b>	<b>SH</b>	<b>FAN</b>	<b>LAB</b>
CAPEX (R\$.hab <sup>-1</sup> )	R\$ 325,66	R\$ 436,61	R\$ 629,52	R\$ 80,72	R\$ 335,67
OPEX (R\$.hab <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	R\$ 7,41	R\$ 16,74	R\$ 16,74	R\$ 13,33	R\$ 118,37
Remoção de MO <sup>1</sup>	>80%	>80%	71-97%	40-70%	60-90%
Remoção de SST	> 85%	> 85%	80-100%	> 70%	90-100%
Remoção de nutrientes <sup>2</sup>	< 40%	> 85%	51-94%	-	60-90%
Área necessária (m <sup>2</sup> .hab <sup>-1</sup> )	2,10	2,10	3,73	0,09	0,09
Energia consumida (kWh.m <sup>-3</sup> tratado)	0	0,03	0,03	0	0,76
Lodo removido (m <sup>3</sup> lodo.m <sup>-3</sup> esgoto tratado)	0	0	0	0,0022	0,0067
Característica do tratamento e do efluente final	Preferível	Aceitável	Aceitável	Não preferível	Não preferível
Complexidade construção e operação	Simples	Intermediária	Intermediária	Simples	Complexa

<sup>1</sup> Remoção de matéria orgânica analisada em termos de DQO.

<sup>2</sup> Remoção de nutrientes analisada em termos de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

É importante ter em vista que há uma grande diferença em termos de caracterização do lodo removido no FAN e no LAB. No LAB, o lodo em excesso é retirado do reator e encaminhado a um reservatório, onde permanece por um determinado período entre as limpezas. Durante esse período ocorre o processo de adensamento do lodo, que reduz seu volume, tornando-o mais denso e com maior concentração de sólidos.

Processo diferente ao que ocorre no FAN, onde não há necessidade de um reservatório de armazenamento, tendo em vista que a produção de lodo é menor e o volume do reator é projetado para armazenar essa biomassa em um intervalo entre limpezas mais longo. Nesse caso, quando ocorre a remoção do lodo do FAN, o caminhão de limpeza succiona junto com o lodo o efluente do reator. Ademais, também é comum, como já mencionado, a aspersão de água sobre o meio filtrante para auxiliar a limpeza, fazendo com que o lodo fique com uma consistência mais líquida. Assim, em função da diluição, há um aumento do volume do lodo gerado no FAN.

A partir das informações apresentadas no Quadro 4, é possível listar algumas das principais limitações e qualidades das tecnologias. Assim, pode-se concluir que o WCH teve destaque com o menor custo de operação e manutenção dentre as tecnologias analisadas. Além disso, o fato de não apresentar geração de lodo, nem consumo de energia, pode ser mencionado

como suas principais vantagens. Pode-se citar ainda a tendência de apresentar uma elevada aceitação dos usuários sobre essa tecnologia, em função da baixa complexidade de construção e operação e das boas características gerais do tratamento, bem como do efluente final.

Como limitações pode-se mencionar, sobretudo, a elevada necessidade por área superficial para sua implantação, característica essa intrínseca aos WC. Ainda na comparação com as demais tecnologias, o WCH apresentou boas eficiências de remoção de MO e SST, no entanto obteve baixas remoções de  $\text{NH}_4^+$ , com eficiências menores que as demais configurações de WC e LAB, porém superiores ao FAN. Com relação ao CAPEX, o WCH apresentou o menor custo dentre as modalidades de WC.

O FAN, como já era esperado, obteve reduzidos custos de construção, operação e manutenção. Além disso, é uma tecnologia muito compacta por possuir baixa exigência por área superficial, com construção e operação simples, não consome energia elétrica, e apesar de existir a produção de lodo, essa é relativamente baixa.

Porém frente a diversas vantagens do FAN, a principal limitação está na reduzida eficiência de remoção de poluentes, principalmente relativo aos nutrientes. Outro fator restritivo para aceitação dos usuários são as características de presença de odor e cor no efluente final, principalmente se a destinação final for o reuso. Ainda sobre o FAN é importante relativizar o seu OPEX com as demais tecnologias. Apesar do FAN ser reconhecido pela reduzida necessidade de operação, sendo necessário apenas a remoção periódica do lodo, observa-se que esses custos competem com o OPEX para as modalidades de WC.

Tanto o WCV quanto o sistema híbrido, apresentaram como principais vantagens a elevada eficiência de remoção de MO, SST e nutrientes, a não geração de lodo e reduzido consumo de energia. Essas características, aliadas ao embelezamento paisagístico e o efluente final clarificado, conferem a ambas tecnologias uma boa visibilidade. Entretanto, considerando a possibilidade de atrair alguns tipos de animais indesejáveis, bem como a geração de ruídos pela operação das bombas, a aceitação dos usuários pode ser prejudicada.

Outras limitações do WCV e SH são as elevadas exigências por área superficial, e relacionado a isso, o elevado CAPEX. Essas limitações são também as principais diferenças entre essas tecnologias. O sistema híbrido difere do WCV, sobretudo, pela segunda unidade de tratamento (WCH) que confere ao sistema maior área (aumento de 2,10 para 3,73  $\text{m}^2 \cdot \text{hab}^{-1}$ ) e maior CAPEX (aumento de R\$ 192,91 por habitante entre as tecnologias). Por outro lado, ganha em termos de eficiência de remoção, uma vez que proporciona após o tratamento anaeróbio



promovido no TS a montante, um processo de tratamento predominantemente aeróbio (WCV) seguido de um anaeróbio (WCH), possibilitando a nitrificação e desnitrificação simultâneas.

A principal qualidade do LAB está relacionada à eficiência na remoção de poluentes, inclusive nutrientes, podendo proporcionar isso em uma reduzida área superficial necessária. É importante destacar também que o custo para implantação do sistema foi mais reduzido que para o WCV e SH, mesmo incluindo o elevado nível de sofisticação da automação no LAB. Por outro lado, essa foi a tecnologia que obteve os custos de operação e manutenção mais elevados (aproximadamente 7 vezes maior do que o WCV e SH, tecnologias que apresentaram o segundo maior OPEX). Também se destacou como limitações no LAB as maiores quantidades de lodo produzido e consumo energético.

Assim, em uma análise mais geral, infere-se que os WC, principalmente o WCH, são tecnologias vantajosas para serem aplicadas em comunidades rurais e localidades periurbanas isoladas. Geralmente nessas localidades, a disponibilidade por área não é uma limitação e as operações e manutenções complexas, que exigem mão de obra ou serviço especializado, apresentam-se como uma dificuldade.

Em áreas mais urbanizadas, onde a densidade populacional é maior e, conseqüentemente, o volume de esgoto produzido e lançado no meio ambiente também é maior, as exigências de qualidade do efluente tratado devem ser mais rigorosas. Por isso, para essas localidades o WCV, SH e LAB são opções mais adequadas. A definição por uma dessas tecnologias está relacionada com a disponibilidade por área, OPEX e produção de lodo, que são as principais divergências e características das tecnologias mencionadas.

Como nessas localidades urbanizadas o custo da área superficial geralmente é maior e os serviços e produtos são de fácil aquisição, pressupõem-se que o LAB seja a tecnologia mais apropriada. No entanto, apesar de se reconhecer que existe certa dificuldade na implantação de sistemas extensivos em área em meio urbanos, deve-se avaliar a possibilidade de implantação dos WC na parcela do terreno destinada a área verde (MEDEIROS, 2017), ou ainda, em telhados de edifícios (HOFFMANN et al., 2011).

Quando os padrões de lançamentos estipulados por legislações não são tão rigorosos, o FAN é uma alternativa viável, tanto para áreas rurais e periurbanas, por apresentar simplicidade de construção e operação, mas principalmente para áreas urbanas, por apresentar baixo requisito de área superficial. Já quando o objetivo é o reuso do efluente tratado, o sistema híbrido apresenta elevado potencial de utilização, pois além de apresentar elevadas eficiências

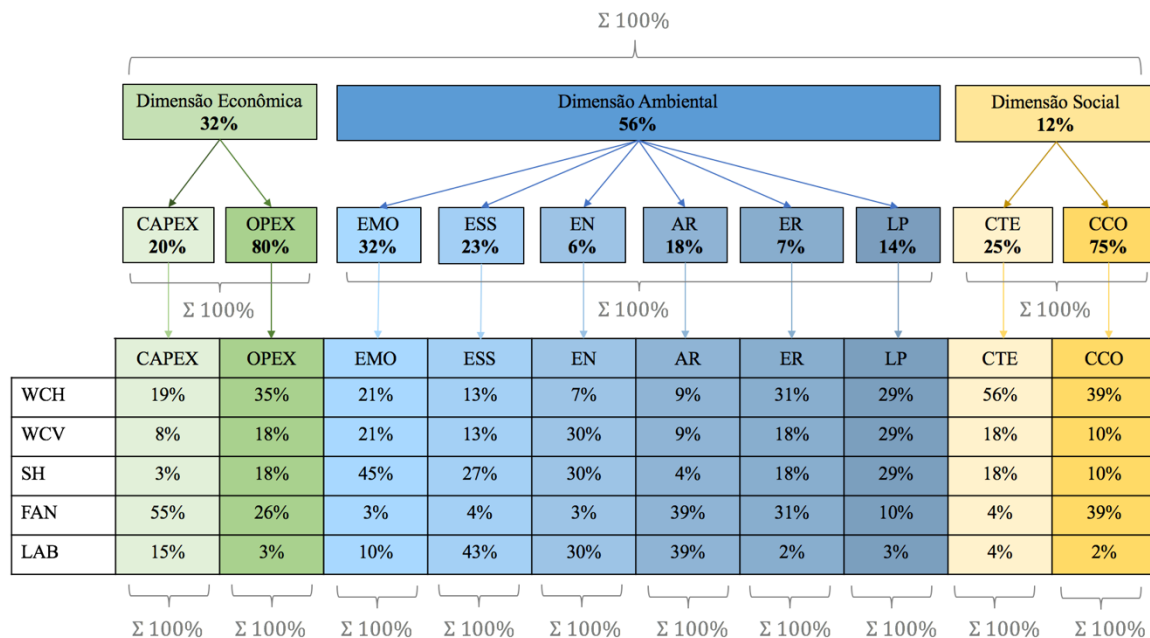
de MO/SST e efluente final clarificado, também apresenta satisfatória remoção de coliformes totais e *E. coli*.

#### 4.10 CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

A opinião do grupo de decisores obtida por meio do questionário, foi compilada em um único julgamento de preferência para obtenção dos vetores de prioridade local (VPL) das dimensões e indicadores de sustentabilidade, apresentados na Figura 18. A opinião de cada organização do grupo de decisores e a descrição de como foram compilados os julgamentos de preferência é apresentada no Apêndice D.

Na Figura 18 também são apresentados os vetores de prioridade local para cada uma das alternativas com base na preferência que essas representam para o indicador de sustentabilidade, posicionado em nível superior da hierarquia. A descrição de como esses pesos de preferências foram obtidos é descrito no Apêndice D.

Figura 18 - Pesos de preferência (ou vetores de prioridade local) das dimensões e indicadores de sustentabilidade expressos em porcentagem.



CAPEX: custo de construção; OPEX: custo de operação e manutenção; EMO: eficiência de remoção de matéria orgânica; ESS: eficiência de remoção de sólidos suspensos; EN: eficiência de remoção de nutrientes; AR: área requerida; ER: energia requerida; LP: lodo produzido; CTE: características do tratamento e do efluente final; CCO: complexidade de construção e operação.

Nota: quanto menor o vetor prioridade local de uma alternativa tecnológica para um determinado indicador de sustentabilidade menor é a preferência sobre essa tecnologia a luz desse indicador.

A partir da Figura 18 observa-se que, para o grupo de decisores abordado neste estudo, a dimensão ambiental (56%) é a mais importante para definição da tecnologia mais sustentável, seguida da econômica (32%) e social (12%) com a menor influência. No quesito dos indicadores de sustentabilidade, para a dimensão econômica, ambiental e social, os indicadores mais influentes são o custo de operação e manutenção (OPEX), a eficiência de remoção de matéria orgânica (EMO) e a complexidade de construção e operação (CCO), respectivamente.

Para a interpretação dos vetores de prioridade local para cada alternativa tecnologia à luz de um indicador de sustentabilidade deve-se considerar que esse valor de VPL indica o grau de preferência dessa alternativa sobre o respectivo indicador, por isso, quanto menor o VPL, menos preferível será a alternativa. A exemplo disso, a interpretação do VPL para o LAB à luz do indicador de custo de operação e manutenção (OPEX), de 3%, indica que: o LAB é a tecnologia que apresentou a menor preferência quando se comparam as opções de tecnologias no quesito de OPEX, pois apresentou o menor VPL. Fato esse justificado por essa ser a tecnologia com os maiores custos envolvidos com a operação e manutenção do sistema.

Por fim, a partir dos vetores de prioridade local foram calculados os vetores de prioridade global (VPG) para cada alternativa tecnológica, representando a preferência que essas apresentam sobre o objetivo principal, ou seja, a escolha da alternativa mais sustentável para o tratamento descentralizado do cenário em questão. Os vetores de prioridade global são apresentados na Figura 19.

A partir dessa figura é possível fazer uma interpretação mais aprofundada sobre a influência que as preferências das alternativas e das dimensões de sustentabilidade representam sobre o vetor prioridade global. A exemplo disso, tomando como base as definições matemáticas do método AHP, pode-se concluir que o OPEX para o LAB contribuiu com um valor de 0,007 do total do VPG calculado para essa tecnologia, de 0,147. Essa parcela do VPG de 0,007 foi obtido pela soma do produto do VPL da alternativa LAB à luz do indicador do OPEX (0,03 ou 3%), pelo VPL do OPEX à luz da dimensão econômica (0,80 ou 80%), e pelo VPL da dimensão econômica à luz do objetivo principal (0,32 ou 32%).

Figura 19 - Vetor prioridade global para as alternativas tecnológicas estudadas.



CAPEX: custo de construção; OPEX: custo de operação e manutenção; EMO: eficiência de remoção de matéria orgânica; ESS: eficiência de remoção de sólidos suspensos; EN: eficiência de remoção de nutrientes; AR: área requerida; ER: energia requerida; LP: lodo produzido; CTE: características do tratamento e do efluente final; CCO: complexidade de construção e operação.

Assim, relativo ao presente estudo, para um determinado contexto tecnológico e cenário proposto, a alternativa melhor classificada foi o WCH ( $\approx 26\%$ ), enquanto que o LAB

( $\approx 15\%$ ) foi classificado como a tecnologia menos sustentável. Apesar das inúmeras vantagens, o LAB obteve o menor VPG em função, sobretudo, do elevado OPEX e da complexidade de construção e operação, indicadores esses que apresentaram um elevado grau de preferência entre os decisores. O contrário é observado para o WCH, que apresentou o menor OPEX e certo grau de facilidade para construção e operação.

Apesar do SH e FAN apresentarem características muito divergentes (em exigência de área, CAPEX, eficiência de tratamento, produção de lodo, requerimento de energia, etc), essas duas tecnologias resultaram em vetores de prioridade global semelhantes entre si. Observa-se também que o SH ocupou o segundo lugar da classificação das tecnologias, e o FAN o terceiro.

Alguns estudos mostram que o LAB e WCV são tecnologias muito utilizadas (CHERNICHARO *et al.*, 2018; SCHROEDER; WALZBURIECH; SEZERINO, 2019). No entanto, neste estudo, essas foram as tecnologias classificadas com o menor VPG, portanto, as menos sustentáveis. É importante ressaltar que a maioria dos processos de seleção de tecnologias de tratamento se concentram na avaliação de apenas alguns critérios, em vez de utilizar um indicador composto como realizado neste estudo.

Além disso, a classificação apresentada neste estudo reflete a opinião do grupo de decisores selecionados para representarem especialistas da área e integrante ligados ao saneamento. No entanto, é evidente que esta não representa necessariamente a tecnologia mais sustentável para qualquer contexto. É importante considerar que diferentes situações podem apresentar necessidades diferentes, por exemplo, em uma situação que não se tenha área disponível, talvez esse seja um dos fatores determinantes para a seleção, isto é, com elevado VPL. Ademais, é muito difícil determinar qual a tecnologia mais sustentável sem utilizar alguma abordagem científica, pois cada alternativa apresenta características favoráveis e desfavoráveis do ponto de vista da sustentabilidade. Por isso, para cada caso, a aplicação do método AHP é válida para selecionar a melhor alternativa, considerando múltiplos fatores, bem como agregando a opinião de todos os envolvidos na tomada de decisão.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs uma avaliação comparativa entre tecnologias normatizadas e não normatizadas do tipo wetlands construídos como alternativas ao tratamento descentralizado de esgoto, para um cenário de 150 habitantes, sob o enfoque da sustentabilidade. Essa foi considerada a partir da introdução das dimensões econômica, ambiental e social, utilizando um método de tomada de decisão com multicritérios: o Método Analítico Hierárquico (AHP). Assim, a partir da avaliação de cinco tecnologias de tratamento de esgoto em nível secundário e/ou superior (filtro anaeróbio – FAN; lodo ativado em batelada – LAB; wetlands construído de fluxo vertical – WCV; wetland construído de fluxo horizontal – WCH; e a combinação dessas duas configurações de WC, formando um sistema híbrido – SH) pode-se concluir:

I. Quanto aos indicadores econômicos de custo de construção (CAPEX) e custo de operação e manutenção (OPEX):

I.i. O FAN apresentou o menor CAPEX dentre as cinco tecnologias avaliadas, resultando em um montante de R\$ 80,72 hab<sup>-1</sup>. Inesperadamente, por serem denominadas como tecnologias de baixo custo, identificou-se que o WCH apresentou CAPEX semelhante ao LAB, bem como o WCV e SH apresentaram custos ainda mais elevados. Para as tecnologias WCH, LAB, WCV e SH, o CAPEX foi calculado em R\$ 325,66 hab<sup>-1</sup>, R\$ 335,67 hab<sup>-1</sup>, R\$ 436,61 hab<sup>-1</sup> e R\$ 629,52 hab<sup>-1</sup>, respectivamente. Os custos mais altos para os WC foram relacionados à grande quantidade de materiais e aos custos com maquinários, em função da elevada área construída. É importante ressaltar que esses levantamentos foram realizados considerando um único tanque reator para o LAB, e a não alternância de uso para o WCH.

I.ii. Para o OPEX, o WCH apresentou o menor valor (R\$ 7,41 hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), na sequência estão o FAN (R\$ 13,33 hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), WCV e SH (ambos com R\$ 16,74 hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), e por último o LAB com os maiores custos de operação e manutenção (R\$ 118,37 hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>). Apesar do FAN ser reconhecido e amplamente requerido pela reduzida necessidade operacional, seu OPEX compete com esses mesmos valores para as modalidades de WC.

I.iii. Em uma avaliação financeira, considerando os valores totais despendidos durante a vida útil de projeto (CAPEX+OPEX), percebe-se que embora o LAB apresente, inicialmente, CAPEX semelhante ao WCH e inferior ao WCV e SH, até o terceiro ano as despesas totais para

o LAB superam todas as demais tecnologias. Assim, ao final da vida útil de projeto (15 anos), a soma do CAPEX e OPEX resulta para o LAB um montante de 7,5 vezes maior do que esses mesmos custos para o FAN, tecnologia mais barata para construção, e 2,4 vezes maior do que para o SH, tecnologia mais cara para construção. Por isso, apesar dos custos de investimentos de diferentes modalidades de WC serem comparáveis ou até mesmo superiores que os custos para o LAB, a principal vantagem econômica que os WC oferecem é o custo significativamente reduzido de operação e manutenção.

II. Quanto aos indicadores ambientais de eficiência de matéria orgânica, sólidos suspensos, nutrientes, requerimento de área, energia e lodo produzido:

II.i. Para as remoções de poluentes, a partir da pesquisa bibliográfica realizada, constatou-se que dentre as cinco tecnologias o FAN é a que possui as menores eficiências de tratamento. Por isso, para localidades com limites de lançamento mais restritivos, a combinação do TS+FAN pode não ser suficiente, sobretudo em função da insignificante remoção de nutrientes e coliformes fecais. O WCH atinge melhores eficiências de tratamento, com boas remoções de matéria orgânica e sólidos suspensos, mas ainda com baixa remoção de nutrientes. As demais tecnologias, WCV, SH e LAB, apresentam a remoção de poluentes como vantagem do processo, sobretudo, por proporcionar um tratamento aeróbio após o tratamento anaeróbio promovido pelo TS a montante. Com o SH e LAB, ainda é possível dispor de uma segunda fase anaeróbia na sequência, atingindo elevadas eficiências de remoção de nutrientes. Por isso, para localidades mais sensíveis e que exijam limites de lançamento mais restritivos, o WCV, SH e LAB são as opções mais adequadas.

II.ii. No quesito consumo de energia e produção de lodo o principal destaque é para as modalidades de WC, já que essas não geram lodo e possuem baixo ou nenhum consumo de energia. Por necessitarem de alimentação intermitente, o WCV e SH consomem de energia 0,03 kWh.m<sup>-3</sup> tratado para a utilização das bombas hidráulicas. Apesar do FAN também não possuir demanda de energia, há produção de lodo (calculada em 0,0022 m<sup>3</sup> de lodo por m<sup>3</sup> tratado), porém em quantidades menores que no LAB (0,0067 m<sup>3</sup> de lodo por m<sup>3</sup> tratado). Por sua vez o LAB é tido como a tecnologia mais desfavorável com relação a esses dois indicadores ambientais, já que possui a maior produção de lodo e consumo de energia (0,76 kWh.m<sup>-3</sup> tratado), sendo este último relacionado à operação de um aerador submersível e três bombas

hidráulicas (para alimentação intermitente, remoção do efluente tratado e remoção do lodo excedente).

II.iii. As maiores exigências por área superficial foram para o sistema híbrido ( $3,73 \text{ m}^2 \cdot \text{hab}^{-1}$ ) e na sequência para o WCH e WCV (ambos com  $2,10 \text{ m}^2 \cdot \text{hab}^{-1}$ ). O LAB e FAN apresentaram pequeno requisito de área superficial, ambos com  $0,09 \text{ m}^2 \cdot \text{hab}^{-1}$ . Apesar do WCV e WCH terem obtido o mesmo requisito de área, deve-se notar que no WCH a totalidade da área é destinada à operação, uma vez que não se adotou alternância de uso. Já no WCV uma parcela (3/4) dessa área é destinada à operação, enquanto o restante permanece em descanso.

III. Quanto aos indicadores sociais que envolvem a aceitação pública dos usuários, relacionada às características do tratamento e do efluente final (CTE) e a complexidade de construção e operação (CCO):

III.i. A avaliação das CTE para o FAN e LAB resultou em uma classificação não preferível, tendo em vista que das seis características analisadas três foram negativas e apenas duas positivas. As desvantagens do FAN são: cor e odor no efluente final, presença de vetores e sem potencial para aproveitamento do lodo. Essas duas últimas também estão presentes no LAB, além da emissão de ruído em função do uso de equipamentos mecânicos. O WCV e SH apresentaram três características positivas (impacto visual, aproveitamento da biomassa das macrófitas e tolerância as variações afluentes), o que conferiu uma avaliação da CTE aceitável. Enfim, o WCH obteve apenas duas características negativas e quatro positivas (não emitir ruído, além das outras três vantagens do WCV e SH), ficando com o melhor conceito de CTE.

III.ii. A CCO teve classificação simples para o FAN e WCH, intermediária para o WCV e SH, por requererem instalação e operação de equipamentos mecânicos, e complexa para o LAB, por apresentar a necessidade de automação do sistema, além do maior número de equipamentos mecânicos.

IV. Quanto a aplicação de metodologia multicriterial para selecionar a tecnologia mais sustentável:

IV.i. Com base na opinião do grupo de tomada de decisão, formado por especialistas e pessoas ligadas ao saneamento, a dimensão ambiental foi considerada a mais influente (56%) na



definição da tecnologia mais sustentável, seguida pela dimensão econômica (32%) e social (12%) com a menor influência.

IV.ii. Os valores de importância dos indicadores de sustentabilidade, também obtidos a partir da opinião do grupo de decisores, mostraram que para a dimensão econômica o OPEX é o indicador mais importante na seleção da tecnologia, com 80% de influência, e os 20% restantes estão relacionados ao CAPEX. Já para a dimensão ambiental, a eficiência de remoção de matéria orgânica tem o maior peso de decisão (32%), enquanto que a eficiência de remoção de nutrientes apresenta a menor influência (6%). Para a dimensão social, a complexidade de construção e operação apresenta impacto significativo, com 75% de preferência, diante de 25% para as características do tratamento e efluente final.

IV.iii. O vetor prioridade global (VPG) das alternativas indicou que a tecnologia melhor classificada foi o WCH, com 25% de prioridade para a escolha. Portanto, essa é a tecnologia que melhor representa um ponto de convergência entre os múltiplos critérios de sustentabilidade avaliados, tendo como base a incorporação da opinião do grupo de decisores sobre a importância desses critérios para a seleção. Na sequência da escala de prioridade estão o SH (22%), FAN (21%), WCV (17%) e LAB (15%).

Não há dúvidas de que a seleção da tecnologia considerando vários critérios permite uma decisão em um contexto mais amplo e integrado, além de apresentar um ponto de convergência entre diferentes critérios e opiniões. O AHP é uma das ferramentas que pode ser utilizada para alcançar esse objetivo. No entanto, é importante considerar que diferentes condições locais podem apresentar diferentes necessidades.

Por fim, os resultados apresentados neste estudo aplicam-se a um determinado cenário proposto e refletem a opinião do grupo de decisores selecionados. De modo geral, esses resultados devem contribuir para facilitar o acesso dos tomadores de decisão e partes interessadas a uma interpretação de um problema complexo e multidimensional. Além disso, este estudo também fornece um contexto valioso para os gestores e poder público na aprovação e implementação de tecnologias de tratamento não normatizadas.

## REFERÊNCIAS

ABIDI, S.; KALLALI, H.; JEDIDI, N.; BOUZAIANE, O.; HASSEN, A. Comparative pilot study of the performances of two constructed wetland wastewater treatment hybrid systems. **Desalination**, v. 246, p. 370-377, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Atlas Esgotos: Despoeição de Bacias Hidrográficas**. Agencia Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <[http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoeicaodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo\\_livro.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoeicaodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf)>. Acesso em: 05 jul. 2018.

ANDRADE NETO, C. O. **Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários: experiências brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES, 1997.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7229. **Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1993, 15p.

\_\_\_\_\_. NBR 13969. **Tanques Sépticos – Unidade de Tratamento Complementar e Disposição Final de Efluentes Líquidos – Projeto e Construção**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997, 60p.

ÁVILA, R. O. **Avaliação do desempenho de sistemas tanque sépticos-filtro anaeróbio com diferentes tipos de meio suporte**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. 166 p.

BALKEMA, A. J.; PREISIG, H. A.; OTTERPOHL, R.; LAMBERT, F. J. D. Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. **Urban Water**, v. 4, n. 2, p. 153-161, 2002.

BENÍTEZ, J.; DELGADO-GALVÁN, X.; IZQUIERDO, J; PÉREZ-GARCÍA, R. Improving consistency in AHP decision-making processes. **Applied Mathematics and Computation**, v. 219, n. 5, p. 2432-2441, 2012.

BORRETO, M.; COMINO, E.; RIGGIO, V. Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 10, p. 1211-1224, 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011**. Diário Oficial da União, Brasília, 16 maio 2011.

BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Water Science & Technology**, v. 35, n. 5, p. 11-1, 1997.

BRIX, H.; SCHIERUP, H. H.; ARIAS, C. A. Twenty years experience with constructed wetland systems in Denmark – what did we learn? **Water Science & Technology**, v. 56, n. 3, p. 63-68, 2007.

CAMPOS, J., R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464 p. Projeto PROSAB

CAVASSIN, S. A. **Uso de metodologias multicritério na avaliação de municípios do Paraná com base no Índice de Desenvolvimento Humano Municipal**. Dissertação de Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. Disponível em: <<https://www.acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/1618/dissertacao.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA – CELESC. **Tarifas e taxas de energia**. Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia#tarifas-vigentes>>. Acesso em 16 out. 2019.

CHATZIMOURATIDIS, A. I.; PILAVACHI, P. A. Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. **Energy Policy**, v. 36, n. 3, p. 1074-1089, 2008.

CHEN, S.; WU, Y.; YANG, L. Application of the Analytic Hierarchy Process for the selection of wastewater reuse targets. **Management Decision**, v. 52, n. 7, p. 1222-1235, 2014.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA - UFMG, 1997. 245 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 5).

CHERNICHARO, C. A. L. **Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios: coletânea de trabalhos técnicos** / Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (coordenador). Belo Horizonte, 2001. Projeto PROSAB.

CHERNICHARO, C. A. L.; FLORENCIO, L.; BASTOS, R. K. X.; PIVELI R. P. P.; SPERLING, V. M.; MOTEGGIA, L. O. **Tratamento de Esgotos e Produção de Efluentes Adequados a Diversas Modalidades de Reúso da Água**. In: FLORENCIO, L.; BASTOS, R. K. X.; AISSE, M. M. (Coord.). **Tratamento e Utilização de Esgotos Sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. Cap. 3, p. 63- 110.

CHERNICHARO, C. A. L.; RIBEIRO, T. B.; GARCIA, G. B.; LERMONTOV, A.; PLATZER C. J.; POSSETTI, G. F. C.; ROSSETO, M. A. L. L. R. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, v. 66, n. 213, p. 5-19, 2018.

COOPER, P. A review of the design and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment systems. **Water Science Technology**, v. 40, n. 3, p. 1–9, 1999.

COOPER, D.; GRIFFIN, P.; COOPER, P. Factors affecting the longevity of sub-surface horizontal flow systems operating as treatment for sewage effluent. **Water Science & Technology**, v. 51, n. 9, p. 127-135, 2005.

COOPER, P. F.; JOB, G. D.; GREEN, M.B.; SHUTES, R. B. E. **Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**. Swindon: WRc plc. 184 p., 1996

CORAUCCI FILHO, B.; ANDRADE NETO, C. O.; MELO, H. N. S.; SOUSA, J. T.; NOUR, E. A. A.; FIGUEIREDO, R. F. **Pós -tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de aplicação no solo**. In: Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: coletânea de trabalhos técnicos / Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (coordenador). Belo Horizonte: Segrac Editora, 2001. Projeto PROSAB

COSTA, H. G. Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão. Niterói, 2002. 104p.

CRITES, R.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Small and Decentralized Wastewater Management Systems**, WCB McGraw-Hill, 1998.

CYBIS, L. F. A.; SANTOS, A. V.; GEHLING, G. R. Eficiência do reator sequencial em batelada (RSB) na remoção de nitrogênio no tratamento de esgoto doméstico com DQO baixa. In: **22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Joinville, 2003.

DECEZARO, S. T. **Sistema de tanque séptico e wetland construído vertical com recirculação para remoção de matéria orgânica e nitrogênio de esgoto doméstico**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

DOTRO, G.; LANGERGRABER, G.; MOLLE, P.; NIVALA, J.; PUIGAGUT, J.; STEIN, O.; VON SPERLING, M. **Treatment Wetlands**. 1. ed. Londres: IWA Publishing, 2017. v. 7

FECHINE, Y. F. Avaliação do Desempenho e da Rotina Operacional em Wetlands Construídos Verticais Empregados no Tratamento de Esgoto Sanitário. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. 164 p.

FIGUEIRA, J; GREGO, S.; EHRGOTT, M. **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. New York: Springer, 2005.

FLORENCIO, L.; BASTOS, R. K. X.; AISSE M. M. (Coord.). Tratamento e utilização de esgotos sanitários: **Reúso das águas de esgoto sanitário, inclusive desenvolvimento de tecnologias de tratamento para este fim**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 427 p. Projeto PROSAB

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE – FUNASA. **6º Caderno de pesquisa em engenharia de saúde pública**. Fundação Nacional de Saúde. Brasília: Funasa, 2013. 224.

GALLARDO-WILLIAMS, M. T.; GEIGER, C. L.; PIDALA, J. A.; MARTIN, D. F. Essential fatty acids from extracts and leachates of southern cattail (*Typha domingensis* P.). **Phytochemistry**, v. 59, p. 305– 308, 2002.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em**

**cenários complexos:** introdução aos métodos discretos do apoio multicritério a decisão. São Paulo: Thomson, 2004. 168 p.

GREEN, M. B.; UPTON, J. Constructed reed beds: A cost effective way to polish wastewater effluents for small communities. **Water Environment Research**, v. 66, n. 3, p. 188-192, 1994.

GUIMARÃES, T. M. V. A. **Comportamento de filtro plantado horizontal (*wetlands* construídos) no tratamento de esgoto unifamiliar**. 2013. 89p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: < <http://tede.ufsc.br/teses/PGEA0477-D.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2018.

HOFFMANN, H.; PLATZER, C.; WINKER, M.; VON MUENCH, E. **Technology review of constructed wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment**. Eschborn: Giz, 36 p., 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Projeção da População**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 out. 2018.

\_\_\_\_\_. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/sinapi/>. Acesso em: 28 jan. 2019.

INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION – IWA. **Constructed Wetlands for Pollution Control: processes, performance, design and operation**. Scientific and technical. London: IWA Publishing, 2000. Report N°. 8.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. Treatment wetlands, Second Edition. **Treatment Wetlands**, p. 965, 2009.

KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: a scenario-based multiple-attribute decision-making approach. **Journal of Environmental Management**, v. 113, p. 158-169, 2012.

KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R.; The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach. **Journal of Environmental Management**, v. 128, n. 15, p. 844–851, 2013.

LEE, S.; VACCARI, M.; TUDOR, T. Considerations for choosing appropriate healthcare waste management treatment technologies: A case study from an East Midlands NHS Trust, in England. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 139-147, 2016.

LIBRALATO, G.; GHIRARDINI, A. V.; AVEZZÙ, F. To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. **Journal of Environmental Management**, v. 94, n. 1, p. 61-68, 2012.

MARINS, F. A. S.; LIMA, A. S. de. **Métodos de tomada de decisão com múltiplos critérios: aplicações na indústria aeroespacial**. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 248 p.

MARINS, C. S.; SOUZA, D. O.; BARROS, M. S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso. **XLI SBPO 2009 – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. 2009. Porto Seguro. Bahia.

MASSOUD, M. A.; TARHINI, A.; NASR, J. A. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 1, p. 652–659, 2009.

MEDEIROS, D. M. de. Estudo sobre a aplicação de wetlands construídos para o tratamento de esgoto em loteamentos, condomínios e comunidões isoladas. 2017. 191p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <  
<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/179012/348175.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 jan. 2020.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 2018 p.

MILUTINOVIC, B.; STEFANOVIC, G.; DASSISTI, M.; MARKOVIC, D.; VUCKOVIC, G. Multi-criteria analysis as a tool for sustainability assessment of a waste management model. **Energy**, v. 74, p. 190-201, 2014.

MOLINOS-SENANTE, M.; GÓMEZ, T.; GARRIDO-BASERBA, M.; CABALLERO, R.; SALA-GARRIDO, R. Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach. *Science of The Total Environment*, v. 497-498, p. 607-617, 2014.

MOREL A.; DIENER S. **Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, Review of different treatment systems for households or neighbourhoods**. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland, 2006.

MOTA, F. S. B.; VON SPERLING, M (Coord.). **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 428 p. Projeto PROSAB.

MUGA, H. E.; MIHELICIC, J. R. Sustainability of wastewater treatment technologies. **Journal of Environmental Management**, v. 88, n. 3, p. 437-447, 2008.

NASUTION, M. A.; WIBAWA, D. S.; AHAMED, T.; NOGUCHI, R. Selection of palm oil mill effluent treatment for biogas generation or compost production using an analytic hierarchy process. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 2, p. 787-799, 2018.

NETTO, O.; M.; C.; SOUZA, M.; A.; A.; LOPES JÚNIOR, R.; P. Retrospectiva e perspectiva da análise tecnológica das alternativas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. In: **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: coletânea de trabalhos técnicos** / Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (coordenador). Belo Horizonte: Segrac Editora, 2001. Projeto PROSAB

NG, W. J.; SIM, T. S.; ONG, S. L.; NG, K. Y.; RAMASAMY, M.; TAN, K. N. Efficiency of

sequencing batch reactor (SBR) in the removal of selected microorganisms from domestic sewage. **Water Research**, v. 27, n. 10, p. 1591-1600, 1993.

OLIVEIRA, R. de. **Contribuição ao Estudo de Tanques Sépticos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1983, 237 p.

OLIVEIRA, S. C.; VON SPERLING, M. Performance Evaluation of Different Wastewater Treatment Technologies Operating in a Developing Country. **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, v. 1, n. 1, p. 37, 2011.

ÖÖVEL, M.; TOOMING, A.; MAURING, T.; MANDER, Ü. Schoolhouse wastewater purification in a LWA-filled hybrid constructed wetland in Estonia. **Ecological Engineering** v. 29, n. 1, p. 17-26, 2007.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD. **Glossary of Statistical Terms**. 2004. Disponível em: <<http://stats.oecd.org/glossary/>>. Acesso em: 07 dez. 2018.

\_\_\_\_\_. **Handbook on constructing composite indicators**. Methodology and user guide. Paris: OECD Publications, 2008.

PARREIRAS, R. O. **Algoritmos Evolucionários e Técnicas de Tomada de Decisão em Análise Multicritério**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PELLISSARI, C. **Dinâmica microbiana nitrificante e desnitrificante em wetland construído vertical**. 2017. 213p. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/178984/347147.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 jul. 2018.

PHILIPPI, L. S.; COSTA, R. H. R.; SEZERINO, P. H. Domestic effluent treatment through integrated system of septic tanks and root zone. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 125-131, 1999.

PHILIPPI, L. S.; SEZERINO, P. H. **Aplicação de sistemas tipo Wetlands no tratamento de águas residuárias: utilização de filtros plantados com macrófitas**. 1. ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2004. 144 p.

PIADEH, F.; ALAVI-MOGHADDAM, M. R.; MARDAN, S. Assessment of sustainability of a hybrid of advanced treatment technologies for recycling industrial wastewater in developing countries: Case study of Iranian industrial parks. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 1136-1150, 2018.

PLATZER, C. HOFFMANN, H. MIGLIO, R. M. Long term experiences with dimensioning and operation of vertical flow constructed wetlands in warm climate regions of South America. **IWA Specialist Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**, 2016.

RODRIGUES, E. B. **Tratamento de esgoto por zona de raízes: experiências vivenciadas numa escola rural no município de Campos Novos/SC**. 2015. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

ROTÁRIA DO BRASIL. Disponível em: <<http://brasil.rotaria.net/>>. Acesso em 08 out. 2019.

ROUSSEAU D. P. L.; VANROLLEGHEM P. A.; PAUW N. D. Constructed wetlands in Flanders: a performance analysis. **Ecological Engineering**, v. 23, p. 151–163, 2004.

ROUSSO, B. Z. **Desempenho de um wetland construído horizontal empregado no tratamento de esgoto doméstico ao longo de 20 anos de operação**. 2014. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <[https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/131759/TCC\\_Benny\\_final\\_WEB\\_.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/131759/TCC_Benny_final_WEB_.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 13 jul. 2018.

ROUSSO, B. Z. **Avaliação de um sistema híbrido de wetlands construídos empregado no tratamento de esgoto sanitário**. 2017. 191 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/178979/348176.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 13 jul. 2018.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operation Research**, v. 48, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L. What is relative measurement? The ratio Scale Phantom. **Mathematical and computational modelling**, v. 17, p. 1-12, 1993.

SANTA CATARINA. **Lei nº 14.675, de 13 de abril de 2009**. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências. Disponível em: [http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/20\\_12\\_2013\\_14.30.40.b479cb7a256a963c9e0bbf87bd860d38.pdf](http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/20_12_2013_14.30.40.b479cb7a256a963c9e0bbf87bd860d38.pdf). Acesso em 02/12/2018.

SANTOS, A. B. (Org.). **Caracterização, tratamento, e gerenciamento de subprodutos de correntes de esgotos segregadas e não segregadas em empreendimentos habitacionais**. Fortaleza: Imprece, 2019. 812 p.

SANTOS, M. O. dos. **Definição da altura de saturação do maciço filtrante em wetland construído vertical empregado no tratamento de esgoto sanitário**. 2015. 105 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/159426/337519.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 13 jul. 2018.

SCHMIDT, A. M. A. **Processo de Apoio à Tomada de Decisão Abordagens: AHP e MACBETH**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de



Santa Catarina, Florianópolis, 1995. 155 p.

SCHROEDER, A. K.; L. WALZBURIECH; SEZERINO, P. H. Wetlands Construídos como Alternativa ao Tratamento Descentralizado de Esgoto em Santa Catarina. In: **4º Simpósio Brasileiro sobre Wetlands Construídos**. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <[https://44edc72e-be57-4d46-a42e-165bc944ee91.filesusr.com/ugd/71101a\\_64937bac678e447ba0c648a8c1cbc296.pdf](https://44edc72e-be57-4d46-a42e-165bc944ee91.filesusr.com/ugd/71101a_64937bac678e447ba0c648a8c1cbc296.pdf)>. Acesso em: 03 dez. 2019.

SERRANO, L.; DE LA VEGA, D.; RUIZ, I.; SOTO, M. Winery wastewater treatment in a hybrid constructed wetland. **Ecological Engineering** v. 37, p. 744-753, 2011.

SEZERINO, P. H. **Potencialidade dos Filtros Plantados com Macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical**. 2006. 171 p. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/103142/225786.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 13 jul. 2018.

SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.; DECAZARO, S. T.; CARISSIMI, E.; PHILIPPI, L. S. Constructed wetlands and sand filter applied as onsite post-treatment of anaerobic effluent. **Water Practice & Technology**, v. 7, n. 3, p. , 2012.

SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.; DECEZARO, S. T.; MAGRI, M. E.; PHILIPPI, L. S. Experiências Brasileiras com Wetlands Construídos Aplicados ao Tratamento de Águas Residuárias: Parâmetros de Projeto para Sistemas Horizontais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, p. 151-158, 2015a

SEZERINO, P. H.; SANTOS, M. O. ; PELISSARI, C. ; CELIS, G.S. ; PHILIPPI, L. S. . Wetlands construídos horizontais aplicados no tratamento descentralizado de esgotos. **Revista Engenharia e Construção Civil**, v. 2, p. 1-9, 2015b

SEZERINO, P. H.; ROUSSO, B. Z.; PELISSARI, C.; SANTOS, M. O.; FREITAS, M. N.; FECHINE, V. Y.; LOPES, A. M. B. **Cartilha Wetlands Construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção**. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018. 56 p.

SIPAHI, S.; TIMOR, M. The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications. **Management Decision**, v. 48, n. 5, p. 775-808, 2010.

SRDJEVIC, Z.; SAMARDZIC, M.; SRDJEVIC, B. Robustness of AHP in selecting wastewater treatment method for the coloured metal industry: Serbian case study. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 29, n. 2, p. 147-161, 2012.

STEFANAKIS, A.; AKRATOS, C. S.; TSIHRINTZIS, V. A. **Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2014.

STEINMETZ, H.; WIESE, J. SCHMITT, T. G. Efficiency of SBR technology in municipal wastewater treatment plants. **Water Science and Technology**, v. 46, n. 4-5, p. 293-299, 2002.

SUBRAMANIAN, N; RAMANATHAN, R. A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management. **International Journal of Production Economics**, v. 138, n. 2, p. 215-241, 2012.

SYTEK-SZMEICHEL, K.; ZUBROWSKA-SUDOL, M. Efficiency of wastewater treatment in SBR and IFAS-MBSBBR systems in specified technological conditions. **Water Science & Technology**, v. 73, n. 6, p. 1349-1356, 2016.

TREIN, C. M. **Monitoramento de sistemas descentralizados de wetlands construídos de fluxo vertical aplicados no tratamento avançado de esgotos**. 2015. 134 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <  
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/134780/334115.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 jul. 2018.

TREN, C. M; PELISSARI, C.; HOFFMANN, H.; PLATZER, C. J.; SEZERINO, P. H.; Tratamento descentralizado de esgotos de empreendimentos comercial e residencial empregando a ecotecnologia dos wetlands construídos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 351-367, 2015.

TZENG, G.; HUANG, J. (2011) **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications**. CRC Press, 2011. 335 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Manual: nitrogen control**. Cincinnati, 1993. 326 p.

\_\_\_\_\_. **A handbook of constructed wetlands: a guide to creating wetlands for agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater**. 1995, 53 p.

\_\_\_\_\_. **Wastewater technology fact sheet sequencing batch reactors**. Washington, 1999. 9 p.

\_\_\_\_\_. **Primer for municipal wastewater treatment systems**. EPA/832-B-04-001. 30 p., 2004a.

\_\_\_\_\_. **Constructed Treatment Wetlands**. 2004b. 2 p.

VAN HAANDEL, A.; MARAIS, G. **O comportamento do sistema de lodo ativado: Teoria e aplicações para projetos e operação**. Campina Grande: Epgraf, 1999. 488 p.

VAN HAANDEL, A. C.; VAN DER LUBBE, J. G. M. **Handbook biological waste water treatment: design and optimization of activated sludge systems**. 2. ed. Londres: IWA Publishing of Alliance House, 2012. 818 p.

VERA, L.; MARTEL, G.; MÁRQUEZ, M. First year performance of a new constructed wetland on the island of Gran Canaria: a case study. In: Masi, F., Nivala, J. (Eds.), **Proceedings of the 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**. International Water Association, p. 1037-1044, 2010.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2 ed. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

\_\_\_\_\_. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 452 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 1).

\_\_\_\_\_. **Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors**. Londres: IWA Publishing, 2007a. 338 p. (Biological Wastewater Treatment; v. 5).

\_\_\_\_\_. **Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal**. Londres: IWA Publishing, 2007b. 306 p. (Biological Wastewater Treatment; v. 1).

\_\_\_\_\_. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 472 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 1).

\_\_\_\_\_. **Lodos ativados**. 4. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016. 461 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 4).

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P.H. **Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil**. Boletim Wetlands Brasil, Edição Especial, 2018. 65 p. Disponível em: <<http://gesad.ufsc.br/boletins/>>. Acesso em: 30 jan. 2018.

VYMAZAL, J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v. 25, n. 5, p. 478-490, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857405001588>>. Acesso em: 16 jul. 2018.

VYMAZAL, J. The use constructed wetlands with horizontal subsurface flow for various types of wastewater. **Ecological Engineering**, v. 35, p.1-17, 2009.

VYMAZAL, J. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. **Water**, v. 2, p. 320-549, 2010.

VYMAZAL, j.; KROPFELOVÁ, L. **Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow**. Environmental pollution, v. 14. Springer, 2008.

WALLACE, S.; KNIGHT, R. **Small-scale constructed wetland treatment systems: Feasibility, Design Criteria and O&M Requirements**. 1 ed. Water Environment Research Foundation (WERF). Londres: IWA Publishing, 2006. 304p.

WILDERER, P.A; SCHREFF D. Decentralized and centralized wastewater management: a challenge for technology developers. **Water Science and Technology**, v. 41, n. 1, p. 1-8, 2000.

WU, H.; ZHANG, J.; NGO, H. H.; GUO, W.; HU, Z.; LIANG, S.; FAN, J.; LIU, H. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. **Bioresource Technology**, v. 175, p. 594—601, 2015.

## APÊNDICE A – Questionário para o grupo de tomada de decisão

Com o objetivo de avaliar comparativamente **tecnologias normatizadas** e os **wetlands construídos** como alternativa ao tratamento descentralizado de efluentes, selecionou-se o **Método de Análise Hierárquica** (AHP) como uma ferramenta de tomada de decisão para selecionar a tecnologia mais adequada ao tratamento do cenário em estudo.

Nesse processo de tomada de decisão as opiniões de especialistas e sujeitos ligados ao saneamento serão incorporadas, através do preenchimento deste **questionário**, que contém 4 perguntas com 20 comparações entre alternativas. Todas as perguntas serão respondidas com base na Escala Fundamental de Saaty (Tabela 26), que transforma o juízo verbal de preferências dos decisores em uma escala de valores numéricos.

### *Exemplo:*

Um sujeito decide comprar um carro, e levará em consideração na compra três fatores: **custo, conforto e ano de fabricação**. Se para esse decisor o custo for o fator mais importante para a tomada de decisão, tendo uma relação de pequena importância sobre o conforto e importância muito grande sobre o ano de fabricação, então será atribuída uma intensidade de importância de 3 para a comparação entre custo e conforto, e 7 para a comparação entre custo e ano de fabricação. Além disso, se para o decisor o conforto tem uma importância absoluta sobre o ano de fabricação, a essa relação será atribuída uma intensidade de importância 9.

Tabela 26 - Escala fundamental de Saaty com valores de importância para o método AHP

<b>Intensidade de importância</b>	<b>Definição</b>	<b>Explicação</b>
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Nas 4 (quatro) questões abaixo, assinale com “X” uma das duas opções apresentadas em cada linha. Coloque na última coluna qual a intensidade de importância da opção assinalada, com base na Escala Fundamental de Saaty (Tabela 26).

1 – Considerando o processo de escolha da melhor alternativa tecnológica para o tratamento descentralizado de esgoto sanitário, qual dos indicadores apresentados abaixo tem maior peso na tomada da decisão?

	<b>Opção 1</b>	<b>Opção 2</b>	<b>Intensidade de importância</b>
a)	Econômico ( )	Ambiental ( )	
b)	Econômico ( )	Social ( )	
c)	Ambiental ( )	Social ( )	

2 - Considerando os fatores econômicos para a escolha da tecnologia, qual dos dois custos é tem maior peso na tomada de decisão?

	<b>Opção 1</b>	<b>Opção 2</b>	<b>Intensidade de importância</b>
a)	Custo de implantação ( )	Custo de operação e manutenção ( )	

3 – Considerando os fatores ambientais para a escolha da tecnologia, qual tem maior peso na tomada da decisão?

	<b>Opção 1</b>	<b>Opção 2</b>	<b>Intensidade de importância</b>
a)	Eficiência de remoção de matéria orgânica ( )	Eficiência de remoção de sólidos suspensos ( )	
b)	Eficiência de remoção de matéria orgânica ( )	Eficiência de remoção de nutrientes ( )	
c)	Eficiência de remoção de sólidos suspensos ( )	Eficiência de remoção de nutrientes ( )	
d)	Eficiência de remoção de matéria orgânica ( )	Área necessária para o tratamento ( )	
e)	Eficiência de remoção de matéria orgânica ( )	Energia requerida ( )	
f)	Eficiência de remoção de matéria orgânica ( )	Lodo produzido ( )	
g)	Eficiência de remoção de sólidos suspensos ( )	Área necessária para o tratamento ( )	
h)	Eficiência de remoção de sólidos suspensos ( )	Energia requerida ( )	
i)	Eficiência de remoção de sólidos suspensos ( )	Lodo produzido ( )	

	<b>Opção 1</b>	<b>Opção 2</b>	<b>Intensidade de importância</b>
j)	Eficiência de remoção de nutrientes ( )	Área necessária para o tratamento ( )	
k)	Eficiência de remoção de nutrientes ( )	Energia requerida ( )	
l)	Eficiência de remoção de nutrientes ( )	Lodo produzido ( )	
m)	Área necessária para o tratamento ( )	Energia requerida ( )	
n)	Área necessária para o tratamento ( )	Lodo produzido ( )	
o)	Energia requerida ( )	Lodo produzido ( )	

4 – Considerando os fatores sociais para a escolha da tecnologia, qual tem maior peso na tomada da decisão?

	<b>Opção 1</b>	<b>Opção 2</b>	<b>Intensidade de importância</b>
a)	Aceitação pública ( )	Complexidade de construção e operação ( )	

## APÊNDICE B – Dimensionamento das tecnologias

Na sequência são apresentados em tabelas um resumo dos critérios e a sequência de cálculo de dimensionamentos das tecnologias analisadas neste estudo. Como já mencionado, para todas elas foram adotados os seguintes dados de entrada:

- Equivalente populacional de 150 habitantes;
- Contribuição do volume de esgoto de  $130 \text{ L.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$ ;
- Carga de DBO do esgoto bruto de  $45 \text{ gDBO.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$
- Eficiência de remoção do tratamento primário para DBO de 30%.

Tabela 27 - Dimensionamento de wetlands construído horizontal para um equivalente populacional de 150 habitantes.

Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade	Faixa recomendada**
Carga de DBO afluente aos wetlands	-	4725,00	g DBO.d <sup>-1</sup>	
Taxa de aplicação orgânica superficial	-	15*	g DBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	6 a 15
Área superficial total requerida	Asup	315,00	m <sup>2</sup>	
Taxa de aplicação hidráulica superficial	-	0,06	m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	Máx de 0,02 a 0,08
Conferência da área com relação a taxa hidráulica	-	315,00	m <sup>2</sup>	
Área superficial total adotada e arredondada	-	315,00	m <sup>2</sup>	
Área superficial total por habitante	-	2,10	m <sup>2</sup> .hab <sup>-1</sup>	
Número de unidades em paralelo	N	3*	unid.	
Área superficial de cada unidade	-	105,00	m <sup>2</sup>	
Comprimento de cada unidade	C	14,50	m	
Largura de cada unidade	L	7,24	m	Máx de 25 a 30
Relação Comprimento/Largura	C:L	2,00	m	2:1 a 4:1
Profundidade útil do líquido	p	0,80*	m	0,40 a 0,80
Altura material filtrante	Hs	0,90*	m	0,50 a 0,90
Distância entre Hs e P	HL	0,10	m	0,10
Entrada e distribuição do afluente (zona entrada)	EDaflu	0,60*	m	0,5 a 1,0
Coleta e retirada do efluente (zona saída)	CReflu	0,60*	m	0,5 a 1,0
Borda livre	bL	0,10*	m	0,10 a 0,2
Porosidade	-	30,00*	%	30 a 40
Volume útil do líquido	-	25,2	m <sup>3</sup>	
Tempo de detenção hidráulica	TDH	1,29	d	
Material filtrante	-	Areia*	mm	1,2 a 25
Material para zona de entrada e saída	-	Brita n. 4*	mm	acima de 50
Taxa de aplicação orgânica transversal	-	241,67	g DBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	Máx de 250

\*Valores adotados.

\*\*As faixas recomendadas por Von Sperling e Sezerino (2018).



Tabela 28 - Dimensionamento de wetlands construído vertical para um equivalente populacional de 150 habitantes.

Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade	Faixa recomendada**
Carga de DBO afluente aos wetlands	-	4725,00	g DBO.d <sup>-1</sup>	
Taxa de aplicação orgânica superficial	-	20*	g DBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	10 a 20
Área superficial requerida em operação	AsupO	236,25	m <sup>2</sup>	
Taxa de aplicação hidráulica superficial	-	0,08	m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	Máx de 0,05 a 0,12
Conferência da área superficial em operação	-	236,25	m <sup>2</sup>	
Área superficial adotada e arredondada em operação	-	236,25	m <sup>2</sup>	
Número de unidades de wetlands construídos	N	4*	unid.	Multiplos de 2 ou 4
Parcela da área em operação (estratégia)	-	3/4*	-	½ ou ¾ em operação
Área superficial requerida total (operação + descanso)	AsupT	315,00	m <sup>2</sup>	
Área superficial total por habitante	-	2,10	m <sup>2</sup> .hab <sup>-1</sup>	
Número de unidades em operação	-	3	unid.	
Área superficial em operação	-	236,25	m <sup>2</sup> em operação	
Número de unidades em descanso	-	1	unid.	
Área superficial em descanso	-	78,75	m <sup>2</sup> em descanso	
Área superficial de cada unidade	-	78,75	m <sup>2</sup> .unid <sup>-1</sup>	Máx de 400 m <sup>2</sup>
Comprimento de cada unidade	C	12,00	m	
Largura de cada unidade	L	6,56	m	
Relação Comprimento/Largura	C:L	1,83	m	
Altura da camada suporte do material filtrante (superior)	Hsup	0,05*	m	0,05 a 0,10
Altura da camada de filtração	Hint	0,50*	m	0,40 a 0,60
Altura da camada de transição	Htrans	0,10	m	
Altura da camada de drenagem (inferior)	Hinf	0,10*	m	0,10 a 0,30
Borda livre	bL	0,20*	m	0,20 a 0,35
Material da camada superior	-	Brita n. 1*	mm	4,8 a 19
Material filtrante	-	Areia grossa	mm	1,2 a 4,8
Material da camada de transição	-	Brita n. 0	mm	4,8 a 9,5
Material da camada inferior (drenagem)	-	Brita n. 1*	mm	4,8 a 19
Intervalo entre pulsos de alimentação	-	4,0*	horas	2 a 8
Frequência de dosagem do efluente	FDaflu	6,0	pulsos.d <sup>-1</sup>	
Volume por pulso	-	3,25	m <sup>3</sup> .pulso <sup>-1</sup>	
Fluxo de bombeamento	-	4,00*	L.m <sup>-2</sup> .min <sup>-1</sup>	
Vazão da bomba	-	56,70	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	
Tempo de acionamento da bomba	-	20,63	min.d <sup>-1</sup>	

\*Valores adotados.

\*\*As faixas recomendadas por Von Sperling e Sezerino (2018).

O wetlands construído de fluxo vertical componente do sistema híbrido seguiu o mesmo dimensionamento apresentado na Tabela 27. O dimensionamento do wetland construído horizontal componente do sistema híbrido é apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 - Dimensionamento de wetlands construído horizontal componente do sistema híbrido para um equivalente populacional de 150 habitantes.

Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade	Faixa recomendada**
Carga de DBO do esgoto bruto		6750,00	gDBO.d <sup>-1</sup>	
Eficiência tratamento primário para DBO		30,00	%	
Eficiência tratamento WCV para DBO		85,00	%	
Carga de DBO afluente aos wetlands		708,75	g DBO.d <sup>-1</sup>	
Taxa de aplicação orgânica superficial	-	15*	g DBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	6 a 15
Área superficial total requerida	Asup	47,25	m <sup>2</sup>	
Taxa de aplicação hidráulica superficial	-	0,41	m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	Máx de 0,02 a 0,08
Taxa de aplicação hidráulica superficial		0,08*	m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	
Conferência da área superficial	-	243,75	m <sup>2</sup>	
Área superficial total adotada		243,75	m <sup>2</sup>	
Taxa de aplicação orgânica superficial ajustada		2,91	g DBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	
Área superficial por habitante		1,63	m <sup>2</sup> .hab <sup>-1</sup>	
Número de unidades em paralelo	N	1*	unid.	
Área superficial de cada unidade		243,75	m <sup>2</sup>	
Comprimento de cada unidade	C	22,2	m	Máx de 25 a 30
Largura de cada unidade	L	10,98	m	
Relação Comprimento/Largura	C:L	2,02	-	2:1 a 4:1
Profundidade útil do líquido	p	0,50*	m	0,40 a 0,80
Altura material filtrante	Hs	0,60*	m	0,50 a 0,90
Distância entre Hs e P	HL	0,10	m	0,10
Entrada e distribuição do afluente (zona entrada)	EDaflu	0,60*	m	0,5 a 1,0
Coleta e retirada do efluente (zona saída)	CReflu	0,60*	m	0,5 a 1,0
Borda livre	bL	0,10*	m	0,10 a 0,2
Porosidade		30,00*	%	30 a 40
Volume útil do líquido		36,5625	m <sup>3</sup>	
Tempo de detenção hidráulica	TDH	2,66	d	
Material filtrante		Areia*	mm	
Material para zona de entrada e saída		Brita n. 4*	mm	
Taxa de aplicação orgânica transversal		107,58	g DBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	Máx de 250

\*Valores adotados.

\*\*As faixas recomendadas por Von Sperling e Sezerino (2018).

Tabela 30 - Dimensionamento de filtro anaeróbio para um equivalente populacional de 150 habitantes.

Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade
Número de contribuintes	N	150	hab
Contribuição de despejos	C	130	L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>
Contribuição total de esgoto	-	19500	L.d <sup>-1</sup>
Tempo de detenção hidráulica	T	0,5*	d
Volume útil	Vu	<b>15600</b>	L
		<b>15,6</b>	m <sup>3</sup>
Altura total interna	H	1,5	m
Altura total do leito filtrante	h	1,2*	m
Altura da calha coletora	h1	0,1*	m
Altura do sobrenadante	h2	0,2*	m
Área superficial	A	13,00	m <sup>2</sup>
Largura	L	2,5	m
Comprimento	C	5,20	m
Conferência volume útil	Vu	<b>15,6</b>	m <sup>3</sup>
		<b>15600</b>	L

\*Valores adotados.

Tabela 31 - Dimensionamento de lodo ativado em batelada para um equivalente populacional de 150 habitantes.

Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade
Número de contribuintes	N	150	hab
Contribuição de despejo	C	130	L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>
Volume útil total do reator	Vur	39000	L
Volume de armazenamento de lodo	Vl	19500	L
Número de reatores	Nreator	1*	
Volume útil de cada reator	Vu	39000	L
Volume de armazenamento de lodo		19500	L
Altura camada de lodo	Hlodo	1,5*	m
Área da base de cada reator	Asup	13	m <sup>2</sup>
Largura reator	L	3,6	m
Comprimento reator	C	3,61	m
Altura total do reator	Hreator	3,00	m
Altura sobressalente (borda livre)	Hbordalivre	0,5*	m
Altura total com borda livre	Htotal	3,50	m
<b>Demanda total de oxigênio</b>	<b>Dox ou RO</b>	<b>16875</b>	<b>gO<sub>2</sub>.d<sup>-1</sup></b>
<b>Demanda total de oxigênio</b>	<b>Dox ou RO</b>	<b>0,70</b>	<b>kgO<sub>2</sub>.h<sup>-1</sup></b>

\*Valores adotados.

### APÊNDICE C – Quantitativo de materiais necessários à construção das tecnologias

Tabela 32 - Quantitativo de materiais para construção de WCH.

DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
PEDRA BRITADA N. 4	23,46	m <sup>3</sup>	R\$ 68,18	R\$ 1.599,64	SINAPI <sup>1</sup>
AREIA GROSSA	260,04	m <sup>3</sup>	R\$ 83,60	R\$ 21.739,17	SINAPI <sup>1</sup>
MANTA TERMOPLASTICA, PEAD, E = 1,00 MM	446,00	m <sup>2</sup>	R\$ 16,68	R\$ 7.439,28	SINAPI <sup>1</sup>
TUBO PVC DN 50 MM	50,00	m	R\$ 8,74	R\$ 437,00	SINAPI <sup>1</sup>
TE PVC, 90 GRAUS, 50 MM	6	un.	R\$ 6,45	R\$ 38,70	SINAPI <sup>1</sup>
CAP PVC DN 50 MM	12	un.	R\$ 2,28	R\$ 27,36	SINAPI <sup>1</sup>
PLANTAS	1260	un.	R\$ 6,00	R\$ 7.560,00	Floricultura
<b>TOTAL DE MATERIAIS PARA WCH</b>				<b>R\$ 38.841,15</b>	

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI

Tabela 33 - Quantitativo de materiais para construção de WCV.

DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
PEDRA BRITADA N. 1	47,25	m <sup>3</sup>	R\$ 62,50	R\$ 2.953,13	SINAPI <sup>1</sup>
AREIA GROSSA	189,00	m <sup>3</sup>	R\$ 83,60	R\$ 15.800,40	SINAPI <sup>1</sup>
MANTA TERMOPLASTICA, PEAD, E = 1,00 MM	457,00	m <sup>2</sup>	R\$ 16,68	R\$ 7.622,76	SINAPI <sup>1</sup>
TUBO PVC DN 50 MM	732,00	m	R\$ 7,20	R\$ 5.270,40	SINAPI <sup>1</sup>
TE PVC, 90 GRAUS, 50 MM	8	un.	R\$ 16,86	R\$ 134,88	SINAPI <sup>1</sup>
CAP PVC DN 50 MM	56	un.	R\$ 2,28	R\$ 127,68	SINAPI <sup>1</sup>
CURVA PVC, 90 GRAUS, DN 50 MM	16	un.	R\$ 10,63	R\$ 170,08	SINAPI <sup>1</sup>
RESERVATÓRIO 500 L	1	un.	R\$ 154,94	R\$ 154,94	SINAPI <sup>1</sup>
PLANTAS	1260	un.	R\$ 6,00	R\$ 7.560,00	Floricultura
<b>TOTAL DE MATERIAIS PARA WCV</b>				<b>R\$ 39.794,27</b>	

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI

Tabela 34 - Quantitativo de materiais para construção do sistema híbrido (WCV+WCH).

DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
PEDRA BRITADA N. 1	47,25	m <sup>3</sup>	R\$ 62,50	R\$ 2.953,13	SINAPI <sup>1</sup>
PEDRA BRITADA N. 4	7,91	m <sup>3</sup>	R\$ 68,18	R\$ 538,99	SINAPI <sup>1</sup>
AREIA GROSSA	327,34	m <sup>3</sup>	R\$ 83,60	R\$ 27.366,01	SINAPI <sup>1</sup>
MANTA TERMOPLASTICA, PEAD, E = 1,00 MM	747,00	m <sup>2</sup>	R\$ 16,68	R\$ 12.459,96	SINAPI <sup>1</sup>
TUBO PVC DN 50 MM	756,00	m	R\$ 7,20	R\$ 5.443,20	SINAPI <sup>1</sup>
TE PVC, 90 GRAUS, 50 MM	10	un.	R\$ 16,86	R\$ 168,60	SINAPI <sup>1</sup>
CAP PVC DN 50 MM	60	un.	R\$ 2,28	R\$ 136,80	SINAPI <sup>1</sup>
CURVA PVC, 90 GRAUS, DN 50 MM	16	un.	R\$ 10,63	R\$ 170,08	SINAPI <sup>1</sup>
RESERVATÓRIO 500 L	1	un.	R\$ 154,94	R\$ 154,94	SINAPI <sup>1</sup>
PLANTAS	2235	un.	R\$ 6,00	R\$ 13.410,00	Floricultura
<b>TOTAL DE MATERIAIS PARA SISTEMA HÍBRIDO</b>				<b>R\$ 62.801,70</b>	

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI

Tabela 35 - Quantitativo de materiais para construção do FAN.

DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
MATERIAIS PARA MONTAGEM DE FÔRMAS (para viga baldrame)	8,22	m <sup>2</sup>	R\$ 27,00*	R\$ 221,92	SINAPI <sup>2</sup>
PEDRA BRITADA N. 0 (para viga baldrame)	0,73	m <sup>3</sup>	R\$ 79,80	R\$ 57,86	SINAPI <sup>1</sup>
PEDRA BRITADA N. 4 (como material filtrante)	15,60	m <sup>3</sup>	R\$ 68,18	R\$ 1.063,61	SINAPI <sup>1</sup>
TELA DE AÇO (para viga baldrame)	14,50	m <sup>2</sup>	R\$ 18,37	R\$ 266,37	SINAPI <sup>1</sup>
CONCRETO USINADO BOMBEÁVEL (para viga baldrame)	2,18	m <sup>3</sup>	R\$ 301,47	R\$ 655,70	SINAPI <sup>1</sup>
TIJOLO CERÂMICO MACIÇO	5730	un.	R\$ 0,32	R\$ 1.833,60	SINAPI <sup>1</sup>
AREIA MÉDIA (para argamassa de assentamento e reboco)	2,39	m <sup>3</sup>	R\$ 67,50	R\$ 161,44	SINAPI <sup>1</sup>
AREIA GROSSA (para argamassa de chapisco)	0,37	m <sup>3</sup>	R\$ 83,60	R\$ 30,61	SINAPI <sup>1</sup>
CIMENTO PORTLAND (para argamassa)	895,31	kg	R\$ 0,50	R\$ 447,66	SINAPI <sup>1</sup>
ADITIVO IMPERMEABILIZANTE (para argamassa de assentamento e reboco)	37,44	L	R\$ 4,42	R\$ 165,47	SINAPI <sup>1</sup>
AÇO (para cinta superior)	23,84	kg	R\$ 4,91	R\$ 117,04	SINAPI <sup>1</sup>
GRAUTE (para cinta superior)	0,92	m <sup>3</sup>	R\$ 327,56	R\$ 301,06	SINAPI <sup>2</sup>
TUBO PVC DN 50 MM	35,70	m	R\$ 7,20	R\$ 257,04	SINAPI <sup>1</sup>
TE PVC, 90 GRAUS, 50 MM	1,00	un.	R\$ 25,73	R\$ 25,73	SINAPI <sup>1</sup>
CURVA PVC, 90 GRAUS, DN 50 MM	2,00	un.	R\$ 17,66	R\$ 35,32	SINAPI <sup>1</sup>
CAP PVC DN 50 MM	6,00	un.	R\$ 6,18	R\$ 37,08	SINAPI <sup>1</sup>
PEÇA RETANGULAR PRÉMOLDADA (para fechamento da estrutura)	0,81	m <sup>3</sup>	R\$ 1.861,87	R\$ 1.508,11	SINAPI <sup>2</sup>
<b>TOTAL DE MATERIAIS PARA SISTEMA HÍBRIDO</b>				<b>R\$ 7.185,60</b>	

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI

2 – Valores referentes a tabela de composições do SINAPI

\* Custo unitário adaptado com base no SINAPI

Tabela 36 - Quantitativo de materiais para construção do LAB.

DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
MATERIAIS PARA MONTAGEM DE FÔRMAS	6,49	m <sup>2</sup>	*	R\$ 146,15	SINAPI <sup>2</sup>
PEDRA BRITADA N. 0	0,65	m <sup>3</sup>	R\$ 79,80	R\$ 51,87	SINAPI <sup>1</sup>
TELA DE AÇO	13,00	m <sup>2</sup>	R\$ 18,37	R\$ 238,81	SINAPI <sup>1</sup>
CONCRETO USINADO BOMBEÁVEL	1,95	m <sup>3</sup>	R\$ 301,47	R\$ 587,87	SINAPI <sup>1</sup>
TIJOLO CERÂMICO MACIÇO	10096	un.	R\$ 0,32	R\$ 3.230,72	SINAPI <sup>1</sup>
AREIA MÉDIA	4,03	m <sup>3</sup>	R\$ 67,50	R\$ 272,04	SINAPI <sup>1</sup>
AREIA GROSSA	0,57	m <sup>3</sup>	R\$ 83,60	R\$ 47,69	SINAPI <sup>1</sup>
CIMENTO PORTLAND	1711,66	kg	R\$ 0,50	R\$ 855,83	SINAPI <sup>1</sup>
ADITIVO IMPERMEABILIZANTE	63,08	L	R\$ 4,42	R\$ 278,83	SINAPI <sup>1</sup>
AÇO	18,00	kg	R\$ 4,91	R\$ 88,37	SINAPI <sup>1</sup>
GRAUTE	0,69	m <sup>3</sup>	R\$ 327,56	R\$ 227,33	SINAPI <sup>2</sup>
PEÇA RETANGULAR PRÉMOLDADA	0,65	m <sup>3</sup>	R\$ 1.861,87	R\$ 1.210,22	SINAPI <sup>2</sup>
RESERVATÓRIO 1000 L	1,00	un.	R\$ 3.470,82	R\$ 3.470,82	SINAPI <sup>1</sup>
RESERVATÓRIO 5000 L	1,00	un.	R\$ 1.673,83	R\$ 1.673,83	SINAPI <sup>1</sup>
<b>TOTAL DE MATERIAIS PARA SISTEMA HÍBRIDO</b>				<b>R\$ 12.380,37</b>	

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI

2 – Valores referentes a tabela de composições do SINAPI

\* Custo unitário adaptado com base no SINAPI

Tabela 37 - Quantitativo de equipamentos

TECNOLOGIA	DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
WCH	-	0	-	R\$ -	R\$ -	-
WCV	BOMBA SUBMERSÍVEL DE ROTOR SEMI-ABERTO, POTENCIA 0,98 HP	3	un.	R\$ 2.314,82	R\$ 6.944,46	SINAPI <sup>1</sup>
SISTEMA HÍBRIDO	BOMBA SUBMERSÍVEL DE ROTOR SEMI-ABERTO, POTENCIA 0,98 HP	3	un.	R\$ 2.314,82	R\$ 6.944,46	SINAPI <sup>1</sup>
FAN	-	0	-	R\$ -	R\$ -	-
LAB	AERADOR MECÂNICO	1	un.	R\$ 9.050,00	R\$ 9.050,00	FLUXOR
	BOMBA SUBMERSÍVEL DE ROTOR SEMI-ABERTO, POTENCIA 0,98 HP	4	un.	R\$ 2.314,82	R\$ 9.259,28	SINAPI <sup>1</sup>

Tabela 38 - Quantitativo de maquinários

TECNOLOGIA	DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
WCH	Retroescavadeira	599*	m <sup>3</sup>	R\$ 8,63	R\$ 5.165,06	SINAPI <sup>2</sup>
WCV	Retroescavadeira	536*	m <sup>3</sup>	R\$ 8,63	R\$ 4.621,37	SINAPI <sup>2</sup>
SISTEMA HÍBRIDO	Retroescavadeira	852*	m <sup>3</sup>	R\$ 8,63	R\$ 7.356,00	SINAPI <sup>2</sup>
FAN	Retroescavadeira	47	m <sup>3</sup>	R\$ 8,63	R\$ 406,68	SINAPI <sup>2</sup>
	Betoneira	57	h	R\$ 3,43	R\$ 196,46	SINAPI <sup>1</sup>
LAB	Retroescavadeira	74	m <sup>3</sup>	R\$ 8,63	R\$ 640,68	SINAPI <sup>2</sup>
	Betoneira	100	h	R\$ 3,43	R\$ 343,24	SINAPI <sup>1</sup>

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI

2 – Valores referentes a tabela de composições do SINAPI

\* Quantidades relativa a escavação e colocação do material filtrante

Tabela 39 - Quantitativo de mão de obra para o wetland construído horizontal.

DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
Pedreiro de obras – para impermeabilização de superfície com geomembrana	89,20	h	R\$19,43	R\$ 1.733,16	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para impermeabilização de superfície com geomembrana	89,20	h	R\$13,84	R\$1.234,53	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para instalação das tubulações	19,00	h	R\$19,43	R\$ 369,17	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para instalação das tubulações	19,00	h	R\$13,84	R\$ 262,96	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para plantio de forração	16,63	h	R\$19,43	R\$ 323,16	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para plantio de forração	66,46	h	R\$13,84	R\$ 919,88	SINAPI <sup>1</sup>
<b>Pedreiro de obras – TOTAL</b>	<b>124,83</b>	<b>h</b>	<b>R\$19,43</b>	<b>R\$2.425,49</b>	-
<b>Servente de obras - TOTAL</b>	<b>174,66</b>	<b>h</b>	<b>R\$13,84</b>	<b>R\$2.417,36</b>	-

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI

2 – Valores referentes a tabela de composições do SINAPI

\*As definições das horas foram determinadas tendo como base a composição de custos do SINAPI.

Tabela 40 - Quantitativo de mão de obra para o wetland construído vertical.

DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
Pedreiro de obras – para impermeabilização de superfície com geomembrana	91,40	h	R\$19,43	R\$ 1.733,16	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para impermeabilização de superfície com geomembrana	91,40	h	R\$13,84	R\$1.234,53	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para instalação das tubulações	278,16	h	R\$19,43	R\$ 369,17	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para instalação das tubulações	278,16	h	R\$13,84	R\$ 262,96	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para plantio de forração	16,63	h	R\$19,43	R\$ 323,16	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para plantio de forração	66,47	h	R\$13,84	R\$ 919,88	SINAPI <sup>1</sup>
<b>Pedreiro de obras – TOTAL</b>	<b>386,19</b>	<b>h</b>	<b>R\$19,43</b>	<b>R\$7.503,71</b>	-
<b>Servente de obras - TOTAL</b>	<b>436,02</b>	<b>h</b>	<b>R\$13,84</b>	<b>R\$6.034,59</b>	-
Instalação de conjunto motobomba submersível até 10 CV	3	un.	R\$197,47	R\$592,41	SINAPI <sup>2</sup>

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI

2 – Valores referentes a tabela de composições do SINAPI

\*As definições das horas foram determinadas tendo como base a composição de custos do SINAPI.

Tabela 41 - Quantitativo de mão de obra para o sistema híbrido

DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
Pedreiro de obras – para impermeabilização de superfície com geomembrana	149,40	h	R\$19,43	R\$ 1.733,16	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para impermeabilização de superfície com geomembrana	149,40	h	R\$13,84	R\$1.234,53	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para instalação das tubulações	287,28	h	R\$19,43	R\$ 369,17	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para instalação das tubulações	287,28	h	R\$13,84	R\$ 262,96	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para plantio de forração	29,50	h	R\$19,43	R\$ 323,16	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para plantio de forração	117,90	h	R\$13,84	R\$ 919,88	SINAPI <sup>1</sup>
<b>Pedreiro de obras – TOTAL</b>	<b>466,18</b>	<b>h</b>	<b>R\$19,43</b>	<b>R\$9.057,92</b>	-
<b>Servente de obras - TOTAL</b>	<b>554,58</b>	<b>h</b>	<b>R\$13,84</b>	<b>R\$7.675,34</b>	-
Instalação de conjunto motobomba submersível até 10 CV	3	un.	R\$197,47	R\$592,41	SINAPI <sup>2</sup>

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI

2 – Valores referentes a tabela de composições do SINAPI

\*As definições das horas foram determinadas tendo como base a composição de custos do SINAPI.

Tabela 42 - Quantitativo de mão de obra para o filtro anaeróbio.

DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
Pedreiro de obras – para montagem e desmontagem das fôrmas	9,41	h	R\$19,43	R\$ 129,05	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para montagem e desmontagem das fôrmas	3,87	h	R\$13,84	R\$ 91,92	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para armação da laje	0,85	h	R\$19,43	R\$ 16,54	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para assentamento de tijolos	48,71	h	R\$19,43	R\$ 946,34	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras – para assentamento de tijolos	48,71	h	R\$13,84	R\$ 674,08	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras – para fazer argamassa	8,57	h	R\$13,84	R\$ 118,65	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para armação da cinta superior	1,17	h	R\$19,43	R\$ 22,79	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para armação da cinta superior	0,83	h	R\$13,84	R\$ 11,48	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para grauteamento	5,53	h	R\$19,43	R\$ 107,45	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para grauteamento	3,91	h	R\$13,84	R\$ 54,13	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para instalação das tubulações	19,99	h	R\$19,43	R\$ 388,44	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para instalação das tubulações	19,99	h	R\$13,84	R\$ 276,69	SINAPI <sup>1</sup>
<b>Pedreiro de obras – TOTAL</b>	<b>85,66</b>	<b>h</b>	<b>R\$19,43</b>	<b>R\$1.664,43</b>	-
<b>Servente de obras - TOTAL</b>	<b>85,88</b>	<b>h</b>	<b>R\$13,84</b>	<b>R\$1.188,61</b>	-
Colocação de pedregulho na laje	15,6	m <sup>3</sup>	R\$ 89,83	R\$ 1.401,35	SINAPI <sup>2</sup>
Colocação de pedregulho nos filtros	0,73	m <sup>3</sup>	R\$ 89,83	R\$ 65,13	SINAPI <sup>2</sup>

1 – Valores referentes a tabela de insumos do SINAPI

2 – Valores referentes a tabela de composições do SINAPI

\*As definições das horas foram determinadas tendo como base a composição de custos do SINAPI.

Tabela 43 - Quantitativo de mão de obra para o lodo ativado em batelada.

DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL	FONTE
Pedreiro de obras – para montagem e desmontagem das fôrmas	7,43	h	R\$19,43	R\$ 144,39	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para montagem e desmontagem das fôrmas	3,06	h	R\$13,84	R\$ 42,31	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para armação da laje	0,77	h	R\$19,43	R\$ 14,90	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para assentamento de tijolos	85,81	h	R\$19,43	R\$ 1.667,33	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras – para assentamento de tijolos	85,81	h	R\$13,84	R\$ 1.187,64	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras – para fazer argamassa	12,51	h	R\$13,84	R\$ 173,08	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para armação da cinta superior	0,89	h	R\$19,43	R\$ 17,21	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para armação da cinta superior	0,63	h	R\$13,84	R\$ 8,67	SINAPI <sup>1</sup>
Pedreiro de obras – para grauteamento	4,18	h	R\$19,43	R\$ 81,13	SINAPI <sup>1</sup>
Servente de obras - para grauteamento	2,95	h	R\$13,84	R\$ 40,88	SINAPI <sup>1</sup>
<b>Pedreiro de obras – TOTAL</b>	<b>99,07</b>	<b>h</b>	<b>R\$19,43</b>	<b>R\$ 1.924,95</b>	-
<b>Servente de obras - TOTAL</b>	<b>104,95</b>	<b>h</b>	<b>R\$13,84</b>	<b>R\$1.452,58</b>	-
Automação do sistema	1	un.	R\$ 15.240,72	R\$ 15.240,72	Prestador de serviço
Colocação de pedregulho nos filtros	0,65	m <sup>3</sup>	R\$ 89,83	R\$ 58,39	SINAPI <sup>2</sup>



## **APÊNDICE D – Obtenção dos vetores de prioridade local e global para as tecnologias utilizando o método AHP**

### ***Obtenção dos vetores de prioridade local para as dimensões e indicadores de sustentabilidade***

As preferências do grupo de decisores sob as comparações entre os pares de elementos, obtidas a partir dos questionários, são apresentadas na Figura 20 e Figura 21 para as dimensões e indicadores de sustentabilidade, respectivamente. Dessa forma é possível determinar a preferência da maioria dos integrantes na comparação entre dois elementos. Por exemplo, na comparação entre a dimensão ambiental e econômica, observa-se que 51% do grupo de decisores (18 pessoas) acham que a dimensão ambiental é mais importante do que a econômica, enquanto 43% (15 pessoas) pensam o contrário. Os 6% restantes (2 pessoas) classificaram a comparação pareada com igual importância entre os elementos, por isso para essa comparação não há uma preferência entre os elementos. Observa-se, também, que a atribuição da igual importância entre os elementos esteve presente em entre todos os pares de comparações, uma vez que nenhum deles apresentou a soma das preferências igual a totalidade dos integrantes (100%).

Assim, os julgamentos individuais do grupo de tomada de decisão foram agregados em um único julgamento de preferência, e a alternativa selecionada entre cada conjunto de comparação pareada, deu-se de modo que essa apresentasse a opção mais preferida entre o grupo de decisores (obtido com base nos valores apresentados na Figura 20 e Figura 21).

Figura 20 - Preferência do grupo de decisores na comparação entre pares das dimensões de sustentabilidade.

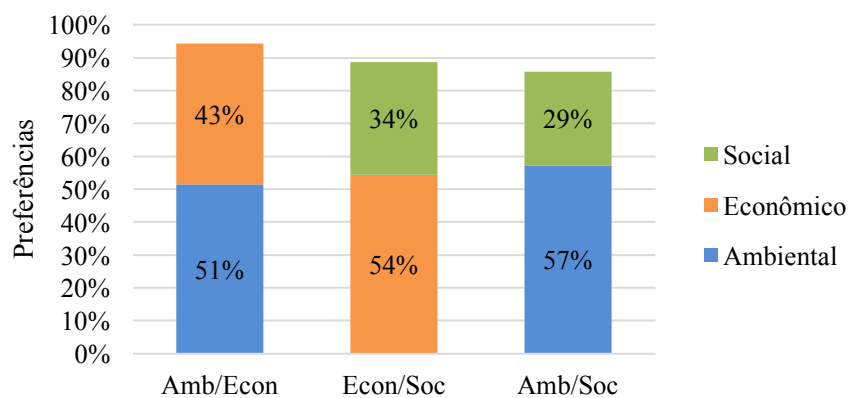
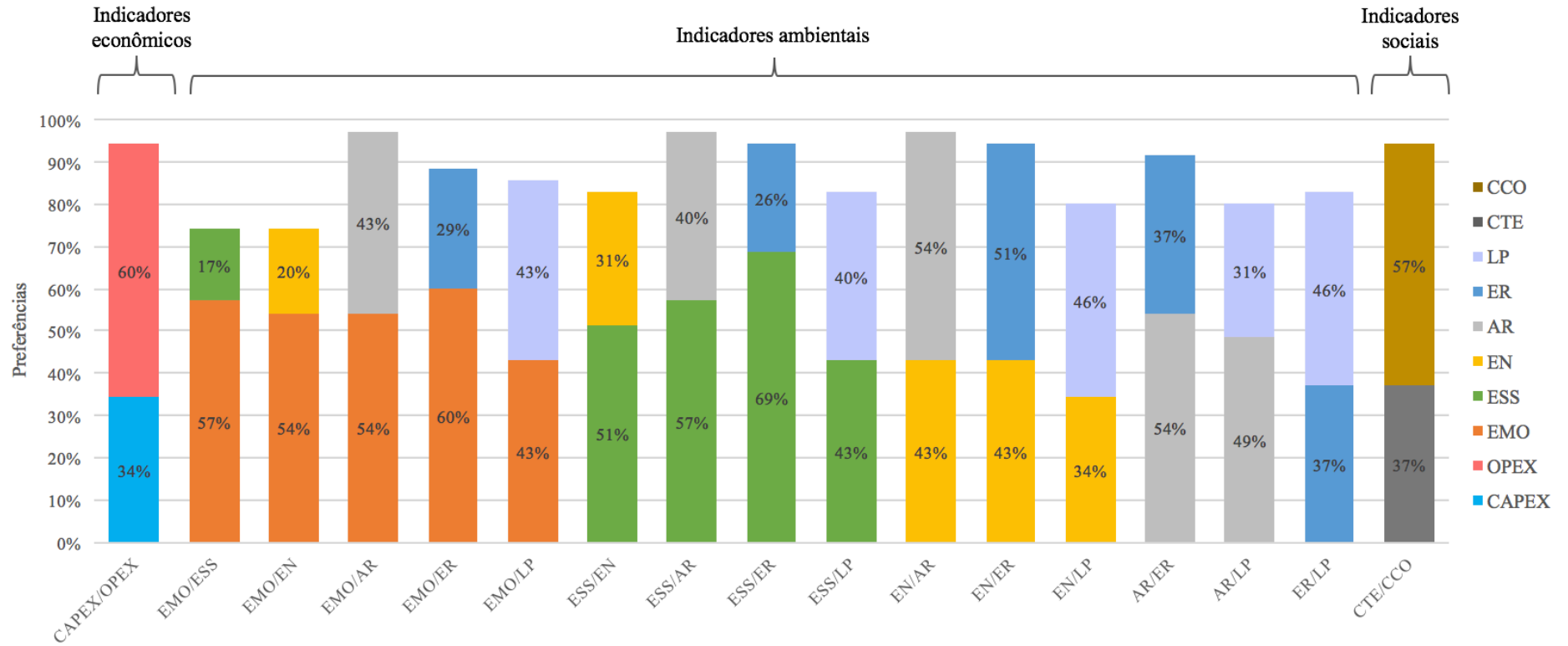


Figura 21 - Preferência do grupo de decisores na comparação entre pares dos indicadores econômicos, ambientais e sociais.



CAPEX: custo de construção; OPEX: custo de operação e manutenção; EMO: eficiência de remoção de matéria orgânica; ESS: eficiência de remoção de sólidos suspensos; EN: eficiência de remoção de nutrientes; AR: área requerida; ER: energia requerida; LP: lodo produzido; CTE: características do tratamento e do efluente final; CCO: complexidade de construção e operação.

Após ter sido definida a prioridade entre a comparação de dois elementos, o passo seguinte consistiu em determinar o valor de importância com base nos valores numéricos da escala fundamental de Saaty (Tabela 2). Neste estudo, a intensidade de importância foi atribuída com base na diferença entre as porcentagens de preferência, de modo que quanto maior fosse essa diferença, maior seria o valor atribuído pela escala de Saaty, representando maior importância de um elemento sobre o outro (Tabela 44). Por exemplo, na comparação de pares entre a eficiência de remoção de sólidos suspensos (43%) e lodo produzido (40%), a diferença entre a porcentagem de preferência desses dois elementos é de 3%. Essa pequena diferença representa que, apesar da ESS ser preferível em relação ao LP, não houve uma grande predominância de um ou outro, por isso, atribuiu-se uma intensidade de importância 2 (Tabela 44), que representa, uma importância muito pequena de um sobre o outro. Enquanto que, na comparação entre eficiência de remoção de sólidos suspensos (69%) e energia requerida (26%), a diferença entre as porcentagens é de 43%, que representa que a grande maioria do grupo de tomada de decisão preferiu ESS a ER, por isso, a essa relação atribuiu-se a intensidade de importância 5 (Tabela 44).

Tabela 44 – Intensidade de importância atribuída à comparação pareada entre elementos das dimensões e indicadores de sustentabilidade com base na diferença entre porcentagens de preferência desses elementos.

<b>Diferença entre porcentagens de preferência entre a comparações</b>	<b>Intensidade de importância com base na Escala Fundamental de Saaty</b>
$X = 0\%$	1
$0\% < X \leq 12,5\%$	2
$12,5\% < X \leq 25\%$	3
$25\% < X \leq 37,5\%$	4
$37,5\% < X \leq 50\%$	5
$50\% < X \leq 62,5\%$	6
$62,5\% < X \leq 75\%$	7
$75\% < X \leq 87,5\%$	8
$87,5\% < X \leq 100\%$	9

OBS.: X é a diferença de porcentagem de preferência na comparação entre dois elementos.

Na Tabela 45 são apresentados os resultados das preferências e intensidade de importância atribuídos a cada comparação pareada. Essas prioridades e valores numéricos foram dispostos em matrizes de comparações, que foram normalizadas e, por fim, obtidos os vetores de prioridade local (VPL) para cada dimensão e indicador de sustentabilidade (Tabela

46). Para cada matriz de decisão foi calculado a razão de consistência (RC) dos julgamentos (Tabela 47). Percebe-se que todas as matrizes foram consideradas como consistentes, uma vez que os IC resultaram em valores inferiores a 0,20 (OECD, 2008).

Tabela 45 – Preferências e intensidade de importância atribuídas para comparações pareadas entre elementos das dimensões e indicadores ambientais.

<b>Crítérios e subcritérios</b>	<b>Elemento 1</b>	<b>Elemento 2</b>	<b>Intensidade de importância</b>
Dimensões de sustentabilidade	Econômico ( )	Ambiental ( X )	2
	Econômico ( X )	Social ( )	3
	Ambiental ( X )	Social ( )	4
Indicadores econômicos	CAPEX ( )	OPEX ( X )	4
Indicadores ambientais	EMO ( X )	ESS ( )	5
	EMO ( X )	EN ( )	4
	EMO ( X )	AR ( )	2
	EMO ( X )	ER ( )	4
	EMO ( )	LP ( )	1
	ESS ( X )	EN ( )	3
	ESS ( X )	AR ( )	3
	ESS ( X )	ER ( )	5
	ESS ( X )	LP ( )	2
	EN ( )	AR ( X )	2
	EN ( )	ER ( X )	2
	EN ( )	LP ( X )	2
	AR ( X )	ER ( )	3
	AR ( X )	LP ( )	3
	ER ( )	LP ( X )	2
Indicadores sociais	CTE ( )	CCO ( X )	3

CAPEX: custo de construção; OPEX: custo de operação e manutenção; EMO: eficiência de remoção de matéria orgânica; ESS: eficiência de remoção de sólidos suspensos; EN: eficiência de remoção de nutrientes; AR: área requerida; ER: energia requerida; LP: lodo produzido; CTE: características do tratamento e do efluente final; CCO: complexidade de construção e operação.

Tabela 46 - Vetores de prioridade local expresso em porcentagem das dimensões e indicadores de sustentabilidade

<b>Dimensão</b>	<b>Peso da dimensão (%)</b>	<b>Indicador</b>	<b>Peso do indicador (%)</b>
Econômica	32%	CAPEX	20%
		OPEX	80%
Ambiental	56%	EMO	32%
		ESS	23%
		EN	6%
		AR	18%
		ER	7%
		LP	14%
Social	12%	CTE	25%
		CCO	75%

CAPEX: custo de construção; OPEX: custo de operação e manutenção; EMO: eficiência de remoção de matéria orgânica; ESS: eficiência de remoção de sólidos suspensos; EN: eficiência de remoção de nutrientes; AR: área requerida; ER: energia requerida; LP: lodo produzido; CTE: características do tratamento e do efluente final; CCO: complexidade de construção e operação.

Tabela 47 - Razão de consistência das matrizes de decisão para definição dos pesos de importância das dimensões e indicadores de sustentabilidade.

<b>Matriz</b>	<b>Ordem da matriz</b>	<b>RI*</b>	<b>RC</b>
Dimensões de sustentabilidade	3	0,58	0,015
Indicadores econômicos	2	0	0,000
Indicadores ambientais	6	1,24	0,135
Indicadores sociais	2	0	0,000

\* Valores adotados de acordo com Tabela 5

### ***Obtenção dos vetores de prioridade local para as alternativas tecnológicas***

Para as alternativas tecnológicas, os vetores de prioridade local foram obtidos a partir das informações qualitativas ou quantitativas apresentadas no Quadro 4. A preferência entre os pares de elementos comparados se deu considerando a opção mais vantajosa. Por exemplo, na comparação entre o CAPEX ou OPEX de duas tecnologias, a preferência é pela alternativa que apresenta o menor valor. Já para as eficiências de tratamento (EMO, ESS e EN) a preferência é pela opção que apresenta o maior valor de remoção dos poluentes.

O valor de importância atribuído para a comparação entre pares das alternativas foi definido tendo como base nas escalas apresentada na Tabela 48 e Tabela 49. Com base nessa lógica, a intensidade de importância 1 da escala fundamental de Saaty é atribuída para comparações pareadas de alternativas que não apresentam diferenças entre valores (para

parâmetros quantitativos) ou entre a classificação conceitual (para parâmetros qualitativos). Enquanto que a intensidade máxima de importância (9) é atribuída à maior variação que pode existir entre os valores ou classificação conceitual.

Para exemplificar, na comparação das alternativas à luz do CAPEX, observa-se que o valor máximo de diferença que pode haver entre a comparação pareada é de R\$ 548,90 (correspondente a comparação entre o CAPEX do SH, maior valor, e FAN, menor valor). Por ser o valor de máxima divergência, a esta comparação é atribuída o peso de importância 9 (que representa a importância absoluta de uma sobre a outra). Ao mesmo tempo que, na comparação das alternativas à luz do OPEX, nota-se que não há diferença entre esses valores quando se compara o WCV com o SH, por isso, a essa comparação é atribuído o peso de importância 1 (que representa a igual importância entre as alternativas). As demais diferenças entre os valores ou classificações conceituais foram dispostas dentro dessa escala de 1 a 9.

Tabela 48 - Escalas adotadas para a comparação das alternativas à luz dos indicadores econômicos e sociais.

Intensidade de importância	Escala para comparação de alternativas à luz do indicador de sustentabilidade			
	CAPEX (R\$.hab <sup>-1</sup> )	OPEX (R\$.hab <sup>-1</sup> )	CTE	CCO
1	X = 0,00	X = 0,00	Preferível/Preferível; Aceitável/Aceitável; Não preferível/Não preferível	Simples/Simples; Intermediária/Intermediária; Complexa/Complexa
2	0,00 < X ≤ 68,61	0,00 < X ≤ 13,87	-	-
3	68,61 < X ≤ 137,23	13,87 < X ≤ 27,74	-	-
4	137,23 < X ≤ 205,84	27,74 < X ≤ 41,61	-	-
5	205,84 < X ≤ 274,45	41,61 < X ≤ 55,48	Preferível/Aceitável; Aceitável/Não Preferível	Simples/Intermediária; Intermediária/Complexa
6	274,45 < X ≤ 343,06	55,48 < X ≤ 69,35	-	-
7	343,06 < X ≤ 411,68	69,35 < X ≤ 83,22	-	-
8	411,68 < X ≤ 480,29	83,22 < X ≤ 97,08	-	-
9	480,29 < X ≤ 548,90	97,08 < X ≤ 110,95	Preferível/Não preferível	Simples/Complexa

OBS.: X é a diferença entre os valores ou informações qualitativas na comparação entre duas alternativas.

CAPEX: custo de construção; OPEX: custo de operação e manutenção; CTE: características do tratamento e do efluente final; CCO: complexidade de construção e operação.

Tabela 49 - Escalas adotadas para a comparação das alternativas à luz dos indicadores ambientais.

Intensidade de importância	Escala para comparação de alternativas à luz do indicador de sustentabilidade					
	EMO (%)	ESS (%)	EM (%)	AR (m <sup>2</sup> .hab <sup>-1</sup> )	ER (kWh.m <sup>-3</sup> esgoto tratado)	LP (m <sup>3</sup> de lodo.m <sup>-3</sup> esgoto tratado)
1	X = 0%	X = 0%	X ≤ 5%	X = 0	X = 0	X = 0
2	-	-	-	0 < X ≤ 0,45	0 < X ≤ 0,10	0 < X ≤ 0,0008
3	0% < X ≤ 10%	0% < X ≤ 7,5%	5% < X ≤ 20%	0,45 < X ≤ 0,91	0,10 < X ≤ 0,19	0,0008 < X ≤ 0,0017
4	-	-	-	0,91 < X ≤ 1,36	0,19 < X ≤ 0,29	0,0017 < X ≤ 0,0025
5	10% < X ≤ 20%	7,5% < X ≤ 15%	20% < X ≤ 40%	1,36 < X ≤ 1,82	0,29 < X ≤ 0,38	0,0025 < X ≤ 0,0033
6	-	-	-	1,82 < X ≤ 2,27	0,38 < X ≤ 0,48	0,0033 < X ≤ 0,0042
7	20% < X ≤ 30%	15% < X ≤ 22,5%	40% < X ≤ 60%	2,27 < X ≤ 2,73	0,48 < X ≤ 0,57	0,0042 < X ≤ 0,0050
8	-	-	-	2,73 < X ≤ 3,18	0,57 < X ≤ 0,67	0,0050 < X ≤ 0,0058
9	30% < X ≤ 40%	22,5% < X ≤ 30%	60% < X ≤ 80%	3,18 < X ≤ 3,64	0,67 < X ≤ 0,76	0,0058 < X ≤ 0,0067

OBS.: X é a diferença entre os valores ou informações qualitativas na comparação entre duas alternativas.

EMO: eficiência de remoção de matéria orgânica; ESS: eficiência de remoção de sólidos suspensos; EN: eficiência de remoção de nutrientes; AR: área requerida; ER: energia requerida; LP: lodo produzido.



Vale ressaltar que, em função dos valores de EMO, ESS e EN correspondem à faixas de remoção e por isso não representam valores precisos, foram criadas escalas com valores mais amplos para avaliar a comparação entre as alternativas. O mesmo é observado para a escala dos parâmetros qualitativos, que por apresentarem apenas três classificações conceituais (preferível, aceitável e não preferível, ou simples, intermediária e complexa) foi definida escala com apenas 3 intensidades de importância.

As preferências e intensidade de importância atribuídas a cada comparação pareada foram dispostas em matrizes de comparações, que foram normalizadas e, por fim, obtidos os vetores de prioridade local para cada alternativa à luz de cada um dos dez indicadores de sustentabilidade (Tabela 50). Para cada matriz de decisão foi calculado a razão de consistência (RC) dos julgamentos (Tabela 47). Todas as matrizes foram consideradas consistentes, já que os IC resultaram em valores inferiores a 0,20 (OECD, 2008).

É importante ressaltar que, frequentemente, a qualidade das aproximações no AHP é avaliada com base na consistência da matriz. Dessa forma, conclui-se que a forma como foram agregados as preferências do grupo de tomada de decisão e a escala adotada para a comparação entre pares das alternativas garantiu boa qualidade para os resultados.

Tabela 50 - Vetores de prioridade local expresso em porcentagem para as alternativas tecnológicas.

Indicadores	Alternativas	Peso das alternativas à luz dos indicadores
CAPEX (Custo de construção)	WCH	19%
	WCV	8%
	SH	3%
	FAN	55%
	LAB	15%
OPEX (Custo de operação e manutenção)	WCH	35%
	WCV	18%
	SH	18%
	FAN	27%
	LAB	3%
EMO (Eficiência de remoção de matéria orgânica)	WCH	21%
	WCV	21%
	SH	46%
	FAN	3%
	LAB	10%
ESS (Eficiência de remoção de sólidos suspensos)	WCH	13%
	WCV	13%
	SH	27%
	FAN	3%
	LAB	43%
EN (Eficiência de remoção de nutrientes)	WCH	7%
	WCV	30%
	SH	30%
	FAN	3%
	LAB	30%
AR (Área requerida)	WCH	9%
	WCV	9%
	SH	3%
	FAN	39%
	LAB	39%
ER (Energia requerida)	WCH	31%
	WCV	18%
	SH	18%
	FAN	31%
	LAB	3%
LP (Lodo produzido)	WCH	29%
	WCV	29%
	SH	29%
	FAN	10%
	LAB	3%
CTE (Características do tratamento e do efluente final)	WCH	56%
	WCV	17%
	SH	17%
	FAN	4%
	LAB	4%
CCO (Complexidade de construção e operação)	WCH	39%
	WCV	10%
	SH	10%
	FAN	39%
	LAB	3%

Tabela 51 - Razão de consistência das matrizes de decisão para definição dos pesos de importância das alternativas tecnológicas à luz dos indicadores.

<b>Matriz</b>	<b>Ordem da matriz</b>	<b>RI*</b>	<b>RC</b>
Comparação entre alternativas à luz do CAPEX	5	1,12	0,073
Comparação entre alternativas à luz do OPEX	5	1,12	0,030
Comparação entre alternativas à luz da EMO	5	1,12	0,061
Comparação entre alternativas à luz da ESS	5	1,12	0,044
Comparação entre alternativas à luz da EN	5	1,12	0,056
Comparação entre alternativas à luz da AR	5	1,12	0,055
Comparação entre alternativas à luz da ER	5	1,12	0,017
Comparação entre alternativas à luz do LP	5	1,12	0,032
Comparação entre alternativas à luz da CTE	5	1,12	0,038
Comparação entre alternativas à luz da CCO	5	1,12	0,039

CAPEX: custo de construção; OPEX: custo de operação e manutenção; EMO: eficiência de remoção de matéria orgânica; ESS: eficiência de remoção de sólidos suspensos; EN: eficiência de remoção de nutrientes; AR: área requerida; ER: energia requerida; LP: lodo produzido; CTE: características do tratamento e do efluente final; CCO: complexidade de construção e operação.