



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

LUCAS VIRGENS DOS SANTOS

Desempenho ambiental de Estação de Tratamento de Esgotos
implantada em uma unidade de ensino



SALVADOR
2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

LUCAS VIRGENS DOS SANTOS

**DESEMPENHO AMBIENTAL DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTOS IMPLANTADA EM UMA
UNIDADE DE ENSINO**

Salvador
2018

LUCAS VIRGENS DOS SANTOS

**DESEMPENHO AMBIENTAL DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTOS IMPLANTADA EM UMA
UNIDADE DE ENSINO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Asher Kiperstok

Co-orientador: Prof. Dr. Luciano Matos Queiroz

Salvador

2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Lucas Virgens dos
Desempenho ambiental de Estação de Tratamento de
Esgotos implantada em uma unidade de ensino / Lucas
Virgens dos Santos. -- Salvador, 2018.
121 f. : il

Orientador: Asher Kiperstok.
Coorientador: Luciano Matos Queiroz.
Dissertação (Mestrado - Engenharia Industrial) --
Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica,
2018.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Estação de
Tratamento de Esgotos. 3. Desempenho ambiental. 4.
Saneamento voltado para o aproveitamento de recursos.
I. Kiperstok, Asher. II. Queiroz, Luciano Matos. III.
Título.

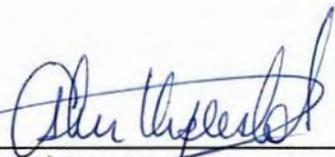
**DESEMPENHO AMBIENTAL DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS
IMPLANTADA EM UMA UNIDADE DE ENSINO**

LUCAS VIRGENS DOS SANTOS

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

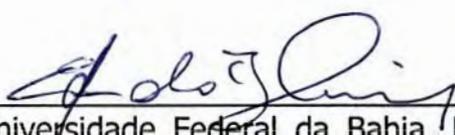
Prof. Dr. Asher Kiperstok


Doutor em Engenharia Química/Tecnologias Ambientais, pela University of Manchester Institute of Science and Technology, UMIST, Inglaterra, 1996.

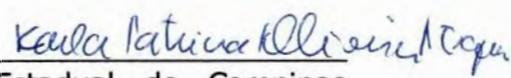
Prof. Dr. Luciano Matos Queiroz


Doutor em Engenharia Civil – Hidráulica, pela Universidade de São Paulo, USP, Brasil, 2009.

Prof. Dr. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva


Doutor em Energia e Meio Ambiente, pela Universidade Federal da Bahia, UFBA, Brasil, 2011.

Prof^a. Dr^a. Karla Patrícia Santos Oliveira Rodríguez Esquerre


Doutora em Engenharia Química, pela Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil, 2003.

Salvador, BA - BRASIL
Novembro/2018

À
Sonia,
minha mãe,
pelos seus 60 anos!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e aos meus santos e espíritos protetores pela chance do recomeço, pela força em todos os momentos e pelas bênçãos de luz;

Aos meus pais, Francisco e Sônia, e à minha irmã, Camila, por todo o apoio, paciência, força e incentivo;

À minha namorada, Daniele Vich, por ter me incentivado desde o começo a fazer o mestrado, por sempre querer o meu crescimento pessoal, pela grande ajuda nas atividades de laboratório, por todos os momentos maravilhosos e por todo o amor e carinho;

Aos meus orientadores, Asher Kiperstok e Luciano Queiroz, por todo o conhecimento transmitido e por terem me guiado pelos melhores caminhos ao longo dessa jornada;

À professora Viviana Zanta, por todo o apoio fornecido no momento da minha volta à universidade;

À Original Ambiental LTDA, por todo o apoio prestado e por ter permitido o desenvolvimento dessa pesquisa em uma das suas ETE. Ao operador da ETE, Luan, pela disposição e boa vontade no auxílio durante as campanhas de coleta;

A todos os integrantes do Grupo de Resíduos e Efluentes da UFBA, sobretudo a Sabrina Amaral, por ter enfrentado comigo o desafio árduo das coletas e análises, e a Tiago Santos, Luciana Santos, Laís Machado e Milena Brandão, por toda a ajuda nas análises físico-químicas e microbiológicas e na manutenção do laboratório.

Ao grupo de ACV da UFBA, especialmente Diego Medeiros e Thaís Lopes, por todo o conhecimento, sugestões e solução de dúvidas;

A Tarssio Barreto e Adelmo Filho, do grupo Gamma da UFBA, pela possibilidade de participar do curso de R e pelos conhecimentos transmitidos;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da UFBA (PEI) pelo apoio fornecido durante o mestrado;

Aos colegas do PEI, pelos momentos de troca de conhecimentos e de descontração;

À PRé Consultants BV, pela concessão da licença para fins de pesquisa do software SimaPro®;

À CAPES, Finep e FAPESB, pelo auxílio financeiro;

A todos os meus amigos e colegas que estiveram, de alguma forma, presentes durante essa jornada.

Força sempre!

“Nunca se vence uma guerra lutando sozinho...”

Raul Seixas - Por quem os sinos dobram
(Raul Seixas - Por quem os sinos dobram, 1979)

*“...esgotados os poderes da ciência,
esgotada toda a nossa paciência,
eis que essa cidade é um esgoto só...”*

Gilberto Gil - Punk da periferia
(Gilberto Gil – Extra, 1983)

RESUMO

O desempenho ambiental das Estações de Tratamento de Esgotos é condicionado unicamente ao atendimento aos padrões descritos pela Resolução CONAMA 430/2011 e, portanto, não é levada em consideração uma visão ampliada de todos os impactos ocorridos ao longo do ciclo de vida operacional. A pesquisa, do tipo estudo de caso, objetivou avaliar os potenciais impactos ambientais de ciclo de vida associados aos distintos cenários de operação de uma ETE descentralizada, que trata os esgotos gerados por uma unidade de ensino, situada em Salvador, Bahia. Foram considerados dois cenários reais de operação, nos quais, no primeiro, a ETE operou conforme a sua concepção original, UASB seguido de um Filtro Aerado de Leito Submerso, e no segundo, os compressores do FAS foram desligados e a ETE passou a operar como um sistema UASB seguido de um filtro anaeróbio. Além disso, foram propostos outros seis cenários hipotéticos, cujos ganhos ambientais foram baseados na lógica do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos. Para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida da fase de operação da ETE, utilizou-se o software SimaPro[®] 8.4, considerou-se dados primários e secundários na construção dos inventários de ciclo de vida e os métodos de avaliação dos impactos utilizados foram o CML-IA baseline v 3.03, onde foram avaliadas as categorias de impacto aquecimento global, eutrofização, toxicidade humana ecotoxicidade de água marinha e ecotoxicidade de água doce, e o Cumulative Energy Demand (CED). O estudo revelou que, em relação aos cenários reais, a concepção anaeróbio/aeróbio apresentou melhor desempenho de ciclo de vida, em função das menores quantidades de nutrientes disposta no corpo hídrico, de metano disposta diretamente no ar e da solução de hipoclorito de sódio aplicada no efluente final. Todavia, ao se comparar os cenários reais com os cenários hipotéticos, o cenário onde foi proposto um fluxo mais circular de recursos, baseado no cenário de operação anaeróbio/aeróbio, apresentou redução significativa dos impactos em todas as categorias analisadas. O estudo também evidenciou que as entradas e saídas com maior influência na redução dos impactos de ciclo de vida foram a disposição final de nutrientes no ambiente, o consumo de energia elétrica e a emissão de metano para a atmosfera. Dessa forma, o desempenho ambiental da ETE pode ser otimizado, não somente a partir de ações de melhoria do desempenho operacional, mas também a partir do aproveitamento de recursos presentes no esgoto ou em seus subprodutos.

Palavras-chave: Estação descentralizada de tratamento de esgotos; saneamento voltado para o aproveitamento de recursos; avaliação do ciclo de vida.

ABSTRACT

In Brazil, the environmental performance of Wastewater Treatment Plants (WWTP) is only conditioned to CONAMA 430/2011 Resolution standards compliance. Therefore all their operational life cycle impacts are not taken into account. The purpose of this case study is to assess the environmental life cycle impacts associated with different operation scenarios of a decentralized wastewater treatment plant that treats sewage produced by a school located in Salvador, Bahia. Two real operating scenarios were considered, where the WWTP operated according to the original design in the first - UASB followed by a submerged aerated filter (SAF) - and in the second, the SAF air compressors were switched off and the WWTP started to operate as a UASB followed by an anaerobic filter. Another six hypothetical scenarios were also proposed, whose environmental gains were based on the resource-oriented sanitation logic. For the life cycle assessment application, SimaPro 8.4 software was used, primary and secondary data were considered in the construction of the life cycle inventory and CML-IA baseline v 3.03 method was chosen, where the impact categories global warming, eutrophication, human toxicity, freshwater ecotoxicity and marine water ecotoxicity were considered. The Cumulative Energy Demand (CED) method was also chosen to evaluate the energy efficiency of the operating scenarios. The results reveal that regarding the real scenarios, the anaerobic/aerobic concept showed better life cycle performance due to the smaller quantities of nutrients disposed of in the adjacent water body, the smaller quantity of methane released in the air and the lower amount of sodium hypochlorite solution applied to the final effluent. However, when comparing real scenarios with hypothetical scenarios, the more circular resources flow scenario, based on a real anaerobic/aerobic operating scenario had significantly reduced impacts in all impact categories analyzed. The study also showed the nutrient disposal in the environment, electricity consumption and methane released to be system hotspots. Thus, the WWTP environmental performance can be optimized, not only through action to improve operational performance, but also through using the resources present in sewage or in its by-products.

Keywords: Decentralized wastewater treatment plants, Resource-oriented sanitation, life cycle assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Vazão afluyente (m ³ /dia) versus Eficiência de remoção de DQO (%) das ETE dos trabalhos apresentados na Tabela 3.1.	35
Figura 3.2 – ETE apresentadas na Tabela 3.1 e respectivas populações atendidas, eficiências de remoção de DQO e SST.....	36
Figura 3.3 - Materiais que podem ser recuperados a partir dos Esgotos Domésticos e suas correntes: A - estruvita; B - bioplástico de polihidroxicanoato e C - biopolímeros de alginatos.....	40
Figura 4.1 – Mapa de localização da ETE.....	52
Figura 4.2 - Fluxograma da ETE	53
Figura 4.3 – Unidades constituintes da ETE: a) Caixa distribuidora de vazão, seguida por dois reatores anaeróbios em paralelo; b) Filtro aerado de leito submerso, decantador secundário, tanques de pressurização e de cloração.....	55
Figura 4.4 - Ponto de amostragem: a) referente ao efluente final tratado; b) lodo do reator anaeróbio 1	56
Figura 4.5 – Metodologia do cone invertido	58
Figura 4.6 - Fronteiras de primeiro e segundo plano do sistema estudado.....	61
Figura 4.7 - Fronteira do sistema do cenário 1 de operação.....	63
Figura 4.8 - Fronteira do sistema do cenário 2 de operação.....	68
Figura 4.9 - Fronteira do sistema do cenário 3 de operação.....	70
Figura 4.10 - Fronteira do sistema do cenário 4 de operação.....	71
Figura 4.11 - Fronteira do sistema do cenário 5 de operação.....	73
Figura 4.12 - Fronteira do sistema do cenário 6 de operação.....	74
Figura 4.13 - Fronteira do sistema do cenário 7 de operação.....	77
Figura 4.14 - Fronteira do sistema do cenário 8 de operação.....	78
Figura 5.1 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 1 de operação da ETE	80
Figura 5.2 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 1 de operação da ETE	81
Figura 5.3 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 2 de operação da ETE	83

Figura 5.4 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 2 de operação da ETE	83
Figura 5.5 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 3 de operação da ETE	85
Figura 5.6 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 3 de operação da ETE	85
Figura 5.7 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 4 de operação da ETE	86
Figura 5.8 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 4 de operação da ETE	87
Figura 5.9 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 5 de operação da ETE	88
Figura 5.10 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 5 de operação da ETE	88
Figura 5.11 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 6 de operação da ETE	89
Figura 5.12 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 6 de operação da ETE	90
Figura 5.13 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 7 de operação da ETE	91
Figura 5.14 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 7 de operação da ETE	92
Figura 5.15 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 8 de operação da ETE	93
Figura 5.16 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 8 de operação da ETE	93
Figura 5.17 - Comparação dos impactos de ciclo de vida entre os cenários de operação	94
Figura 5.18 – Demanda de energia acumulada dos cenários de operação da ETE ..	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo dos trabalhos desenvolvidos em ETE descentralizadas, entre 2011 e 2018	30
Tabela 4.1 - Resumo das unidades de tratamento da ETE.....	54
Tabela 4.2 – Volume total de esgoto tratado, durante 20 anos	62
Tabela 4.3 - Quantidade da solução de hipoclorito de sódio a 15% utilizada na ETE	63
Tabela 4.4 - Consumo energético dos equipamentos elétricos da ETE	64
Tabela 4.5 – Biomassa total presente nos compartimentos de digestão dos reatores anaeróbios 1 e 2.....	65
Tabela 4.6 – Quantidade total de lodo encaminhado para o aterro, em 20 anos	65
Tabela 4.7 - Concentração, carga, quantitativo e correlação com a unidade funcional dos parâmetros físico-químicos do efluente final tratado	66
Tabela 4.8 - Quantidade de metano produzido pelos reatores anaeróbios 1 e 2 na ETE	67
Tabela 4.9 – Cálculo da energia gerada por meio do aproveitamento da energia química disponível no biogás produzido pelos reatores anaeróbios 1 e 2	68
Tabela 4.10 - Consumo dos equipamentos elétricos da ETE no cenário 2, considerando a energia evitada	69
Tabela 4.11 - Concentração, carga, quantitativo e correlação com a unidade funcional dos parâmetros físico-químicos do efluente final tratado, para o cenário 3	70
Tabela 4.12 – Previsão de consumo de água de reúso, nas bacias sanitárias.....	72
Tabela 4.13 - Concentração, carga, quantitativo e correlação com a unidade funcional dos parâmetros físico-químicos do efluente final tratado no cenário 4.....	72
Tabela 4.14 - Consumo energético dos equipamentos elétricos da ETE, no cenário 5	73
Tabela 4.15 - Quantidade da solução de hipoclorito de sódio a 15% utilizada na ETE, no cenário 6.....	74
Tabela 4.16 - Consumo energético dos equipamentos elétricos da ETE, na fase 2 ..	75
Tabela 4.17 - Quantidade de metano produzido pelos reatores anaeróbios 1 e 2 na ETE, na fase 2.....	75

Tabela 4.18 - Concentração, carga, quantitativo e correlação com a unidade funcional dos parâmetros físico-químicos do efluente final tratado, na fase 2.....	76
Tabela 4.19 - Cálculo da energia gerada por meio do aproveitamento da energia química disponível no biogás produzido pelos reatores anaeróbios 1 e 2, referente à fase 2 de monitoramento.....	77
Tabela 4.20 - Consumo elétrico dos equipamentos elétricos da ETE no cenário 7, considerando a energia evitada	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Padrões de lançamento de efluentes de ETE em corpos hídricos, estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011	24
Quadro 3.2 - Atratividades e limitações das ETE descentralizadas	25
Quadro 3.3 - Experiências de Sistemas descentralizados de tratamento de esgotos, em países desenvolvidos e em desenvolvimento	27
Quadro 3.4 - Tecnologias para o aproveitamento integrado de energia, nutrientes e água de reúso nas ETE.....	40
Quadro 3.5 – Resumo de alguns trabalhos de ACV em sistemas de tratamento de esgoto	45
Quadro 4.1 – Parâmetros analisados e respectivos métodos	57
Quadro 4.2 – Resumo dos cenários de operação da ETE	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida
AVT	Ácidos Voláteis Totais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CT	Coliformes totais
DS	Decantador secundário
EEE	Estação Elevatória de Esgotos
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FAS	Filtro aerado de leito submerso
FAN	Filtro anaeróbio
FBMSO	Filtro Biológico com meio suporte orgânico
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DS	Decantador secundário
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
NBR	Norma Brasileira
NMP	Número mais provável
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento
PRFV	Plástico reforçado com fibra de vidro
RENTED	Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados
SNIS	Sistema Nacional de informações sobre saneamento
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
SS	Sólidos Sedimentáveis
SST	Sólidos em Suspensão Totais
SSF	Sólidos em Suspensão Fixos
SSV	Sólidos em Suspensão Voláteis
TS	Tanque séptico
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WC	<i>Wetlands</i> construídos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	OBJETIVOS.....	22
2.1	Objetivo Geral.....	22
2.2	Objetivos Específicos.....	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1	Sistemas descentralizados de tratamento de esgotos.....	23
3.2	O Conceito NEXUS e o saneamento voltado para o aproveitamento de recursos: oportunidades de melhoria do desempenho ambiental das ETE descentralizadas.....	37
3.3	A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta de avaliação do desempenho ambiental de ETE descentralizadas.....	43
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	51
4.1	Descrição geral da pesquisa.....	51
4.2	Descrição da ETE.....	51
4.3	Descrição do monitoramento.....	55
4.4	Análise do Desempenho Ambiental por meio da Avaliação de Ciclo de Vida	57
4.4.1	Definição de objetivo e escopo.....	59
4.4.2	Metodologia para o cálculo das entradas e saídas dos inventários de ciclo de vida	62
4.4.3	Apresentação dos resultados.....	78
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
5.1	Resultados do monitoramento.....	80
5.2	Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 1.....	80
5.3	Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 2.....	83

5.4	Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 3	84
5.5	Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 4	86
5.6	Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 5	88
5.7	Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 6	89
5.8	Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 7	91
5.9	Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 8	93
5.10	Comparação entre os cenários	94
5.10.1	Indicador de eficiência energética – CED.....	98
5.11	Limitações do estudo	99
6	CONCLUSÕES	101
7	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	103
8	REFERÊNCIAS.....	104
	APÊNDICE A – Resultados das análises físico-químicas das etapas de monitoramento da ETE	112
	APÊNDICE B – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 1 de operação da ETE	114
	APÊNDICE C – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 2 de operação da ETE	115
	APÊNDICE D – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 3 de operação da ETE	116
	APÊNDICE E – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 4 de operação da ETE	117
	APÊNDICE F – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 5 de operação da ETE	118
	APÊNDICE G – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 6 de operação da ETE	119
	APÊNDICE H – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 7 de operação da ETE	120

APÊNDICE I – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 8 de operação da ETE	121
---	-----

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das cidades e o conseqüente aumento populacional produzem inúmeros desafios para o planejamento do espaço urbano, como a promoção de condições adequadas de ocupação, transporte, saúde, assim como de saneamento. Dentro desse contexto, a gestão das excretas humanas consiste de uma problemática de grande relevância mundial, uma vez que esse produto é fruto das atividades humanas e está diretamente associado à ocorrência de diversas doenças, em que se destacam aquelas de veiculação hídrica, sobretudo nos países em desenvolvimento, onde os índices de coleta e disposição adequada desse efluente ainda são muito baixos.

No Brasil, diversas ações no sentido de aumentar os índices de coleta e tratamento dos esgotos urbanos foram realizadas, principalmente a partir dos anos 1970, com o início do Plano Nacional de Saneamento Básico, o PLANASA. Todavia, em relação a estas ações, o modelo de gestão predominante, desde então, foi o centralizado, no qual todo o esgoto produzido em uma determinada localidade é misturado e encaminhado para uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), geralmente de grande porte.

Embora tenham ocorrido avanços significativos desde o início da sua aplicação, os sistemas centralizados apresentam limitações para a universalização dos serviços de coleta e tratamento dos esgotos gerados, em decorrência dos elevados custos de implantação, operação e manutenção, além da intrínseca complexidade operacional, que inviabiliza a sua aplicação em pequenas cidades e em localidades isoladas.

Conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, no ano de 2016, cerca de apenas 52% da população total brasileira era atendida por rede de coleta de esgoto. Do volume total de esgotos coletado, 75% recebeu algum tipo de tratamento. Ao se considerar todo o volume de esgotos gerado no país, o índice de tratamento cai para 45% (BRASIL, 2018).

Assim, as ETE descentralizadas se destacam como uma alternativa a ser considerada para o melhoramento desses índices, tendo em vista que, em geral, empregam processos de tratamento de operação simplificada, apresentam menor porte, menores custos de implantação e operação, menor tamanho da rede coletora e ainda facilitam

realizar o reúso da água tratada, uma vez que são localizadas próximas ao local de produção dos esgotos. Ademais, podem ser a única alternativa quando aplicadas em comunidades isoladas e em empreendimentos comerciais e residenciais, situados em localidades onde não há sistema de coleta e tratamento de esgotos.

Desde 2012, no Brasil, alguns estudos têm sido desenvolvidos para avaliar as características, a aplicabilidade, a eficiência e os impactos ambientais das ETE descentralizadas, por meio da Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados – RENTED, um projeto financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), com 13 instituições de ensino participantes.

No Estado da Bahia, em geral, o tratamento descentralizado dos esgotos domésticos é exigido pelo órgão ambiental competente para a implantação de um empreendimento, seja comercial ou residencial, em locais onde inexistem rede de coleta e transporte de esgotos sanitários, de forma a mitigar os impactos ambientais provocados pela disposição final do efluente gerado.

Nessas ETE, geralmente adota-se a combinação de processos de tratamento anaeróbio / aeróbio, dada a facilidade e o baixo custo operacional dos sistemas anaeróbios e a incapacidade desses em atender aos requisitos da legislação ambiental. Todavia, o uso de processos aeróbios no polimento de efluente anaeróbio, demanda uma operação qualificada, além de elevado custo energético. Portanto, a combinação de distintos processos anaeróbios de tratamento nas ETE descentralizadas, pode ser operacional e ambientalmente atrativa, tendo em vista que apresenta operação simplificada e menor consumo de energia.

Embora a implantação de uma ETE descentralizada tenha como objetivos principais o tratamento dos esgotos gerados por uma localidade e o posterior reúso da água tratada, não se observa, no Estado da Bahia, essa última prática. Assim, o saneamento voltado para o aproveitamento de recursos se mostra uma oportunidade de melhoria ambiental na operação dessas instalações, uma vez que visa recuperar água, energia e nutrientes a partir do esgoto, principalmente, sendo por isso, alinhada com o recente conceito *Nexus* água – energia alimento. Além disso, tal prática vem ganhando destaque atualmente, dado que os crescimentos populacional e econômico acarretam a escassez de recursos do meio ambiente.

A análise do desempenho ambiental dessas ETE é condicionada apenas ao atendimento dos requisitos para a disposição final do efluente. Isso implica desconsiderar diversos impactos, inclusive aqueles ocorridos durante o ciclo de vida da ETE. Portanto, faz-se necessário adotar uma abordagem mais ampla, não somente na análise dos cenários reais de operação, como também de cenários hipotéticos, baseados na melhoria operacional e na adoção de práticas circulares de aproveitamento de recursos. Para isso, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite realizar um estudo mais detalhado, acerca dos impactos ambientais causados ao longo do ciclo de vida da ETE, de forma a facilitar o processo de tomada de decisão entre distintas situações operacionais.

Portanto, à face do exposto, apresenta-se o seguinte problema de pesquisa: qual cenário operacional de uma ETE descentralizada, que trata os esgotos gerados por uma unidade de ensino, proporciona melhor desempenho, em termos de impactos ambientais de ciclo de vida?

Assim, esse trabalho busca investigar o desempenho ambiental de uma ETE, que trata os esgotos gerados por uma unidade de ensino, em dois cenários reais de operação – anaeróbio/aeróbio e anaeróbio/anaeróbio – e em cenários hipotéticos, baseados em ganhos ambientais proporcionados pelo aproveitamento de recursos a partir do esgoto.

Nessa lógica, no capítulo 2 são apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho; no capítulo 3 é realizada uma revisão bibliográfica acerca das ETE descentralizadas e da prática do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos; no capítulo 4 são apresentadas as metodologias utilizadas no desenvolvimento do trabalho; no capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados do desempenho ambiental de cada cenário de operação da ETE; no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e no capítulo 7 são apresentadas as recomendações para estudos futuros.

Destaca-se que esse trabalho é parte integrante dos estudos da RENTED, um projeto financiado pela Finep, no Edital Chamadas Públicas MCT/Finep/Ação Transversal Saneamento Ambiental e Habitação 06/2010.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho ambiental de uma ETE descentralizada que trata esgotos gerados em uma unidade de ensino.

2.2 Objetivos Específicos

- Elaborar o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) de cada cenário operacional, avaliar e comparar os respectivos impactos de ciclo de vida;
- Avaliar cenários hipotéticos distintos, cujos fluxos de materiais sejam baseados em ganhos ambientais proporcionados pelo aproveitamento de recursos;
- Identificar as entradas e saídas com maior influência na redução dos impactos de ciclo de vida da etapa de operação da ETE.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistemas descentralizados de tratamento de esgotos

O manejo dos esgotos de uma determinada localidade pode ser implantado de forma centralizada, descentralizada ou a partir de uma combinação de ambas. Libralato *et al.* (2012) afirmam que, atualmente, existe um forte debate científico sobre a dicotomia centralização / descentralização, no qual se têm evidenciado as principais limitações sociais, ambientais e econômicas de cada alternativa. No entanto, não é possível afirmar, de forma universal, qual alternativa é a melhor. Precisa-se analisar caso a caso.

Sistemas centralizados têm sido considerados como aqueles que coletam os esgotos gerados nas residências, empreendimentos comerciais, indústrias e os encaminham para uma ETE localizada fora dos limites da localidade ou da cidade (WILDERER e SCHREFF, 2000) e, em geral, atendem áreas com elevada densidade populacional (LOMBARDO, 2004). Segundo Ho (2005), as principais vantagens desses sistemas são: a economia de escala obtida em áreas densamente habitadas, tendem, em geral, a ser bem operados e a apresentar boa manutenção, apresentam maior confiabilidade do serviço e são mais convenientes para os moradores realizarem a conexão dos esgotos gerados à rede de coleta.

Entretanto, os custos elevados de implantação, operação e manutenção dos sistemas centralizados de coleta, transporte e tratamento de esgotos impõem limitações, principalmente, às comunidades isoladas e pequenas localidades, no atendimento à legislação ambiental de lançamento de efluentes oriundos de ETE no ambiente (USEPA, 2005). Além disso, requerem manutenção periódica e uma renovação do sistema a cada 60 – 70 anos; apresentam flexibilidade limitada para planejamento em longo prazo, a disposição do efluente final representa uma alta carga de poluentes para o ambiente e são vulneráveis a colapsos e vazamentos, que podem ocasionar a poluição de mananciais (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

O tratamento centralizado de esgotos, embora apresente benefícios, segundo Oliveira Junior (2013), pode dificultar o atendimento de parte da população, principalmente

comunidades carentes e residentes de locais mais isolados, nas quais se observa o aumento da incidência de doenças entéricas, presença de vetores e uma consequente poluição difusa, de difícil solução. Assim, em função dos elevados custos de implantação e operação dos sistemas centralizados de coleta e tratamento de esgotos, a implementação de ETE descentralizadas vem ganhando relevância nos países em desenvolvimento (MASSOUD *et al.*, 2009).

O Estado da Bahia não possui uma legislação específica para o lançamento de efluentes em corpos hídricos, nem para o reúso da água tratada. Dessa forma, aplica-se a legislação vigente, a Resolução CONAMA 430/2011, cujos requisitos estão descritos no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Padrões de lançamento de efluentes de ETE em corpos hídricos, estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011

Parâmetro	Padrão de lançamento
pH	Entre 5 e 9
Temperatura	Inferior a 40°C
Materiais sedimentáveis	Até 1 mL/L, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura.
Demanda Bioquímica de Oxigênio	Valor máximo de 120 mg/L, sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.
Óleos e graxas	Até 100 mg/L
Materiais flutuantes	Ausência

Fonte: Brasil (2011).

Já o conceito de manejo descentralizado de esgotos sanitários, segundo Crites e Tchobanoglous (1998), consiste na coleta, tratamento e disposição final, ou ainda o reúso da água na unidade ou próximo do local de geração. Nessa abordagem, mais de uma ETE atende uma determinada localidade, com a possibilidade de aplicar distintas tecnologias de tratamento (LIBRALATO *et al.*, 2012).

No ano de 1997, a Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) elencou os benefícios proporcionados pelos sistemas descentralizados de esgoto, cujas instalações se configuram como uma opção de custo-benefício atrativo, para promover a qualidade da água e, conseqüentemente, a saúde pública (USEPA, 1997).

Segundo TCHOBANOGLOUS *et al.* (2004), as ETE descentralizadas podem ser classificadas em:

- Individuais ou *on-site* – ETE implantadas em residências unifamiliares, compostas geralmente por tanque séptico e sumidouro, ou por tanque séptico, uma unidade de tratamento de esgoto e um sumidouro;
- *Cluster* – ETE destinadas a tratar os esgotos gerados por um grupo de 4 a 12 casas. Segundo Massoud *et al.* (2009), são geralmente indicadas para áreas densamente habitadas ou que tenham topografia acidentada e solo com condições inadequadas;
- ETE implantadas em unidades habitacionais isoladas – destinadas a tratar os esgotos gerados por conjuntos habitacionais isolados;
- ETE implantadas em instalações comerciais, residenciais, institucionais e recreativas - destinadas a realizar o tratamento dos esgotos gerados por unidades comerciais, apartamentos, unidades de ensino, parques etc;
- Satélites – ETE descentralizadas integradas a sistemas centralizados. O reúso do esgoto tratado é feito localmente e os sólidos produzidos são encaminhados para a ETE centralizada.

Um ponto que deve ser destacado é a distinção entre ETE descentralizadas e ETE compactas. Libralato *et al.* (2012) afirmam que não há uma correspondência exata entre os dois conceitos, pois, embora as ETE compactas sejam instaladas para atender uma demanda local, de forma descentralizada, nem todas as ETE descentralizadas são necessariamente compactas.

No contexto do manejo dos esgotos sanitários, a abordagem centralizada é considerada usualmente como ideal, muito em função da sua importância histórica na mitigação dos problemas relacionados de saúde pública, enfrentados ao longo do século XX. Contudo, as ETE descentralizadas também apresentam uma série de vantagens e desvantagens que devem ser avaliadas, no momento do planejamento dos serviços de coleta e tratamento de esgoto de uma determinada localidade, as quais estão listadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Atratividades e limitações das ETE descentralizadas

Atratividades	Limitações
São pequenas, robustas, fáceis de operar, não necessitam de mão-de-obra especializada e	Com frequência, são observadas inadequações no projeto e construção das ETE descentralizadas, em função da ausência de

Atratividades	Limitações
apresentam tamanho total da rede de coleta muito menor que os sistemas centralizados;	normas específicas. Por esse motivo, é comum observar falhas na operação dessas estruturas;
Quando bem gerenciadas, possibilitam obter uma qualidade de tratamento do esgoto similar à das plantas centralizadas, com menor custo;	Não recebem a devida atenção técnica durante a operação;
Favorecem o reúso da água tratada e, conseqüentemente, o seu retorno para a bacia de origem, a depender do tipo da comunidade, das alternativas técnicas e das características locais;	O custo operacional de várias estações descentralizadas pode ser mais elevado do que o custo operacional de uma grande ETE centralizada;
Não requerem um alto investimento para serem instaladas, principalmente em locais mais isolados, pois não há a necessidade de construir uma rede de coleta de esgoto;	Fatores subjetivos, a exemplo da estética e da produção de odor, podem implicar a rejeição da instalação dessas estruturas, pela população;
Em eventos de falha, com conseqüente extravasamento de esgoto bruto para o meio ambiente, as conseqüências são menores do que nas ETE centralizadas;	A efetividade das ETE descentralizadas envolve a aplicação de um programa de gerenciamento adequado, com inspeção e manutenção regulares.
Permitem a implementação de inovações tecnológicas, já que o custo de investimento geralmente é menor do que nas ETE centralizadas;	
Apresentam menor vulnerabilidade a eventos acidentais extremos, a exemplo de desastres naturais, quedas de energia, além de atividades terroristas;	
Facilitam o emprego da segregação da urina na fonte, o que leva a reduzir a dispersão de micropoluentes no ambiente, além de permitir a recuperação de nutrientes;	
Podem ser implantadas em módulos, o que possibilita a sua expansão futura, em caso de necessidade de aumento da capacidade de tratamento;	
Frente ao atual desenvolvimento de tecnologias confiáveis de monitoramento remoto e automação, é possível operar as ETE descentralizadas à distância.	

Fonte: adaptado de Wilderer e Schreff (2000), USEPA (2005), Orth (2007), Etnier *et al.* (2007), Borsuk *et al.* (2008), Massoud *et al.* (2009), Wang (2014), Singh *et al.* (2015), Capodaglio (2017) e Capodaglio *et al.* (2017).

Em relação às tecnologias de tratamento, de acordo com Capodaglio *et al.* (2017), qualquer processo de tratamento pode ser adotado nas ETE descentralizadas, contudo, nem todas as opções podem ser uma escolha coerente. No momento da seleção, as principais características a serem levadas em consideração devem ser a

eficiência de tratamento, simplicidade de operação e manutenção da ETE, confiabilidade operacional, possibilidade de expansão e viabilidade econômica. Massoud *et al.* (2009) ainda destaca que a tecnologia a ser escolhida deve ser a mais apropriada. Contudo, ainda se observa, nos países em desenvolvimento, a seleção de tecnologias inadequadas às realidades climática e física, aos recursos humanos e financeiros e à aceitabilidade social, em função da ausência de pesquisa e desenvolvimento nesses locais.

De acordo com Capodaglio *et al.* (2017), os processos de tratamento de esgotos mais comumente empregados em ETE descentralizadas são os tanques sépticos e Imhoff, wetlands construídos, reatores biológicos de membrana, lodos ativados e reatores UASB. Os mesmos autores ainda ressaltam que os reatores biológicos de membrana podem, futuramente, desempenhar um papel de destaque nas ETE descentralizadas. Todavia o alto custo, a alta necessidade de manutenção, o elevado consumo de energia e a perda progressiva da capacidade de filtração constituem ainda sérias limitações para a disseminação do processo.

Nos países em desenvolvimento, embora os sistemas centralizados sejam a principal alternativa de manejo adotada, a abordagem descentralizada tem ganhado cada vez mais relevância, principalmente com o objetivo de tratar os esgotos gerados por comunidades isoladas e pela população residente de locais sem a presença de rede de coleta de esgotos. Já nos países desenvolvidos, a descentralização já é uma prática comum. Como exemplos, o Quadro 3.3 mostra algumas experiências de aplicação de ETE descentralizadas em países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Quadro 3.3 - Experiências de Sistemas descentralizados de tratamento de esgotos, em países desenvolvidos e em desenvolvimento

País	Experiência	Fonte
Estados Unidos da América	Cerca de 25% da população é atendida por ETE descentralizadas, principalmente nas regiões rurais.	USEPA, 2005
Japão	É considerado um país pioneiro na descentralização, com aproximadamente 2.500 ETE em operação, atuando no tratamento e reúso do esgoto gerado por grandes blocos residenciais e comerciais.	Kimura <i>et al.</i> (2007) apud Libralato <i>et al.</i> (2012)
El Salvador	Cerca de 650 pessoas são atendidas por uma ETE descentralizada, constituída por <i>wetlands</i> construídos, na vila de San José Las Flores, Chalatenango.	Gauss (2008)

País	Experiência	Fonte
Nicarágua	Implantada uma ETE descentralizada que atende cerca de 1.000 pessoas, na cidade de Masaya, constituída por Tanque Imhoff e quatro <i>wetlands</i> construídos. O efluente produzido atende os padrões de lançamento do país e é utilizado na irrigação de diversos tipos de culturas agrícolas.	Gauss (2008)
Itália	Aproximadamente 6% da população total é atendida por ETE descentralizadas, as quais representam cerca de 73% do total de ETE existentes no país.	Libralato <i>et al.</i> (2012)
Alemanha e Suíça	Experiências têm sido implantadas em áreas urbanas, servindo populações de até 1.000 pessoas, realizando o reúso de água e a recuperação de energia e recursos, com apoio dos moradores.	Capodaglio (2017)
Zimbabwe	Na cidade de Redcliff, ETE descentralizadas, utilizando tecnologias como <i>wetlands</i> construídos e sistemas de lagoas, atendem a população, cujo efluente final é utilizado na agricultura.	Chirisa <i>et al.</i> (2017)

Fonte: Próprio autor.

Além dessas iniciativas, existem diversos estudos sendo realizados para identificar as vantagens e desvantagens da gestão descentralizada dos esgotos domésticos. Van Afferden *et al.* (2015) desenvolveram uma ferramenta de decisão e suporte, baseada em Sistema de Informações Geográficas (SIG) e em um banco de dados com informações sobre população, águas subterrâneas, topografia, hidrologia, rede existente de esgoto, tecnologias de tratamento de esgoto e padrões de reúso de uma determinada localidade. Com o uso da ferramenta, em um estudo de caso realizado em duas vilas na Jordânia, um dos cenários de gestão descentralizada dos esgotos apresentou custo 40% menor em relação ao cenário de tratamento centralizado, principalmente em função dos custos de operação e manutenção serem sensivelmente menores.

Suriyachan *et al.* (2012) realizaram uma avaliação de três ETE descentralizadas, na cidade de Bangkok, visando avaliar o potencial do uso de sistemas de gestão descentralizada de esgotos, no desenvolvimento urbano. Observou-se que as ETE descentralizadas apresentaram custos de implantação competitivos, visto que a extensão da rede de esgoto foi menor, a tecnologia aplicada era simples e a eficiência de tratamento observada foi elevada, alcançada com boas práticas de operação e manutenção. Além disso, entre 30 e 100% da água tratada foi reutilizada na irrigação de áreas verdes.

Garcia *et al.* (2013) realizaram um estudo comparativo entre a qualidade do efluente final de três ETE, uma centralizada, de tecnologia aeróbia, e duas descentralizadas, uma com processo de lodos ativados e outra com tanque séptico. Para a realização do estudo, parte do esgoto afluente à ETE municipal foi desviada para as duas instalações descentralizadas, de forma que fosse assegurado que todas recebessem o mesmo esgoto. Os autores concluíram que a qualidade do efluente final, em relação à maioria dos parâmetros físico-químicos analisados, foi muito similar, em relação às ETE centralizada e a descentralizada aeróbia. Já a qualidade do efluente final da ETE descentralizada anaeróbia não cumpriu os requisitos ambientais do *Texas Commission on Environmental Quality*.

Outros trabalhos de monitoramento e estudo de ETE descentralizadas operando em escala real foram desenvolvidos, em distintos locais. A Tabela 3.1 lista o resumo desses trabalhos.

Tabela 3.1 – Resumo dos trabalhos desenvolvidos em ETE descentralizadas, entre 2011 e 2018

Trabalho	Fonte e Local	Tipo / Processo de tratamento	População atendida / Vazão afluente média	Descrição	Caracterização do Esgoto Bruto	Resultados
1	Garzón-Zuñiga e Buelna, 2011 (Morelos - México)	ETE para o tratamento de instalação institucional - Escola / TS + FBMSO	1200 habitantes / 5 m ³ /dia	Análise do desempenho operacional de uma ETE descentralizada que trata os efluentes gerados por uma unidade de ensino, durante período chuvoso e seco, com o desligamento do sistema de aeração forçada.	DBO: 225 ± 126 mg O ₂ /L DQO: 423 ± 183 mg O ₂ /L NTK: 250 ± 112 mg N/L N. amoniacal: 184 ± 56 mg N-NH ₃ /L F. solúvel: 15,6 ± 6,4 mg P-PO ₄ ³⁻ /L Óleos e Graxas: 18 ± 7 mg/L SST: 120 ± 62 mg SST/L SSV: 82 ± 56 mg SSV/L CT: 1,6E+08 ± 4,13E+08 Log CT/100mL Helmintos: 1 ± 2 ovos de helmintos/L	<p>Eficiências de remoção - aeração desligada e período chuvoso: DBO: 98% DQO: 5% NTK: 70% N. amoniacal: 94% F. solúvel: 10% Óleos e Graxas: 72% SST: 65% SSV: 80% CT: 99% Helmintos: 100%</p> <p>Eficiências de remoção - aeração desligada e período seco: DBO: 97% DQO: 71% NTK: 93% N. amoniacal: 90% F. solúvel: 11% Óleos e Graxas: 61% SST: 95% SSV: 96% CT: >99,99% Helmintos: 100%</p>
2	Ferreira, 2013 (Bahia - Brasil)	Cluster / UASB + WC	1000 habitantes / 175 m ³ /dia	Avaliação da eficiência de uma ETE descentralizada, que atende um condomínio residencial, sob duas condições operacionais: com e sem a realização da recirculação do efluente final.	Não houve caracterização do esgoto bruto.	<p>Eficiências médias de remoção nos WC, com a recirculação do efluente final (1 -sombriinha chinesa, 2 - taboa): DQO: 76% (1); 75% (2) ST: 36% (1); 31% (2) STV: 47% (1); 41% (2) STF: 30% (1); 25% (2) SST: 82% (1); 79% (2) SSV: 75% (1); 72% (2) SSF: 83% (1); 81% (2) N. Amoniacal: 18% (1); 15% (2) NTK: 24% (1); 18% (2) F. Solúvel: 14% (1); 7% (2) F. Total: 20% (1); 17% (2) CT: 1 log (1 e 2)</p> <p>Eficiências médias de remoção nos WC, sem a recirculação do efluente final (1 - sombrinha chinesa, 2 - taboa): DQO: 70% (1); 69% (2) ST: 33% (1); 28% (2) STV: 39% (1); 36% (2) STF: 29% (1); 22% (2) SST: 82% (1); 83% (2) SSV: 72% (1); 73% (2) SSF: 85% (1); 87% (2) N. Amoniacal: 25% (1); 20% (2) NTK: 25% (1); 22% (2) F. Solúvel: 13% (1); 7% (2) F. Total: 16% (1); 10% (2) CT: 1 log (1 e 2)</p>

Tabela 3.1 – Resumo dos trabalhos desenvolvidos em ETE descentralizadas, entre 2011 e 2018

Trabalho	Fonte e Local	Tipo / Processo de tratamento	População atendida / Vazão afluente média	Descrição	Caracterização do Esgoto Bruto		Resultados	
3	Santos, 2013 (Paraíba - Brasil)	Individual / Sistema 1: TS + S Sistema 2: UASB + S	4 pessoas / Sistema 1, fase 1: 0,54 m ³ /dia; sistema 1, fase 2: 0,28 m ³ /dia; sistema 2, fase 1: 0,52 m ³ /dia; sistema 2, fase 2, 0,26 m ³ /dia.	Avaliação da eficiência do tratamento de esgoto doméstico unifamiliar, realizada por dois sistemas distintos.	Afluente fase 1: pH: 7,1 Alcalinidade: 367,5 mg CaCO ₃ /L AGV: 97,9 mg/L DQO Total: 334 mg O ₂ /L DQO Filtrada: 162 mg O ₂ /L ST: 839 mg ST/L STV: 285 mg STV/L NTK: 39 mg N/L N. Amoniacal: 33 mg N-NH ₃ /L F. Total: 6,1 mg P/L F. Solúvel: 4,39 mg P-PO ₄ ³⁻ /L	Afluente fase 2: pH: 7,2 Alcalinidade: 339 mg CaCO ₃ /L AGV: 88 mg/L DQO Total: 430 mg O ₂ /L DQO Filtrada: 188 mg O ₂ /L ST: 853 mg ST/L STV: 278 mg STV/L SST: 164 mg SST/L NTK: 53,4 mg N/L N. Amoniacal: 42,1 mg N-NH ₃ /L F. Total: 6,9 mg P/L F. solúvel: 4,3 mg P-PO ₄ ³⁻ /L	<p>Eficiências de remoção do TS: AGV: 27% (F1); 58% (F2) DQO Total: 44% (F1); 58% (F2) DQO Filtrada: 26% (F1); 38% (F2) ST: 8% (F1); 13% (F2) STV: 30% (F1); 31% (F2) SST: 59% (F1); 78% (F2) SSV: 57% (F1); 80% (F2)</p> <p>Eficiências de remoção do UASB: AGV: 35% (F1); 42% (F2) DQO Total: 57% (F1); 60,5% (F2) DQO Filtrada: 36% (F1); 51% (F2) ST: 11% (F1); 17% (F2) STV: 31% (F1); 37% (F2) SST: 74% (F1); 80% (F2) SSV: 71% (F1); 82% (F2)</p>	
4	Mendonça, 2015 (São Paulo - Brasil)	Individual / TS + WC	4 pessoas / 0,64 m ³ /dia*	Avaliação da eficiência de uma ETE experimental, com vazão afluente equivalente ao fluxo produzido por uma residência unifamiliar.	<p>DBO: 430 ± 110 mg O₂/L DQO: 613 ± 165 mg O₂/L NTK: 72 ± 6 mg N/L N. amoniacal: 53 ± 7 mg N-NH₃/L Nitrito: 0,43 ± 0,27 mg N-NO₃/L Nitrito: 0,1 ± 0,06 mg N-NO₂/L F. total: 9,6 ± 1,5 mg P/L F. solúvel: 6,9 ± 2,1 mg P-PO₄³⁻/L ST: 667 ± 97 mg ST/L SST: 154 ± 93 mg SST/L SSV: 137 ± 91 mg SSV/L</p>	<p>SDT: 513 ± 78 mg SDT/L SDV: 218 ± 63 mg SDV/L S. sedimentáveis: 3,6 ± 6,9 mL Alcalinidade total: 259 ± 43 mg CaCO₃/L pH: 6,93 ± 0,49 Sulfato: 29,1 ± 18,7 mg SO₄²⁻/L Cloretos: 89 ± 26 mg Cl⁻/L Óleos e Graxas: 88 ± 99,8 mg/L CT: 1,4x10⁷ ± 1x10⁷ NMP/100mL</p>	<p>Eficiências de remoção para vazão média: DBO: 96% DQO: 90% NTK: 41% N. amoniacal: 23% F. total: 60% F. Solúvel: 52% ST: 33% STV: 69% SST: 74% SSV: 96% S. Sedimentáveis: 75%</p>	<p>Eficiências de remoção para vazão máxima: DBO: 90% DQO: 82% NTK: 20% N. amoniacal: 25% F. total: 22% F. Solúvel: 56% ST: 30% STV: 58% SST: 49% SSV: 52% S. Sedimentáveis: 70%</p>

Tabela 3.1 – Resumo dos trabalhos desenvolvidos em ETE descentralizadas, entre 2011 e 2018

Trabalho	Fonte e Local	Tipo / Processo de tratamento	População atendida / Vazão afluente média	Descrição	Caracterização do Esgoto Bruto	Resultados
5	Trein, 2015 (Santa Catarina - Brasil)	ETE para o tratamento de instalação comercial / RAC + WCFV	250 pessoas / 12,2 m ³ /dia	Avaliação de WC aplicados no tratamento descentralizado de esgotos gerados por uma empresa de embalagens.	pH: 6,9 Alcalinidade: 281 mg CaCO ₃ /L DQO: 704 mg O ₂ /L N. amoniacal: 79 mg N-NH ₃ /L Nitrito: 0,1 mg N-NO ₂ /L Nitrito: 0,1 mg N-NO ₂ /L Nitrito: 0,1 mg N-NO ₂ /L F. solúvel: 21 mg P-PO ₄ ³⁻ /L ST: 656 mg ST/L SST: 174 mg SST/L CT: 2,91 x 10 ⁸ NMP/100 mL <i>E. coli</i> : 2,14 x 10 ⁷ NMP/100 mL	Eficiências de remoção: DBO: 88% DQO: 75% SST: 83% N-NH ₄ ⁺ : 47% F. solúvel: 93% CT: 1,07 log <i>E. coli</i> : 0,99 log
6	Trein, 2015 (Santa Catarina - Brasil)	Cluster / RAC + WCFV+MFS	100 pessoas / 18,1 m ³ /dia	Avaliação de WC aplicados no tratamento descentralizado de esgotos gerados por um condomínio residencial	pH: 7,5 Alcalinidade: 235 mg CaCO ₃ /L DQO: 289 mg O ₂ /L DBO: 158 mg O ₂ /L N. amoniacal: 50 mg N-NH ₃ /L Nitrito: 0,1 mg N-NO ₂ /L Nitrito: 0,1 mg N-NO ₂ /L Nitrito: 0,1 mg N-NO ₂ /L F. solúvel: 17 mg P-PO ₄ ³⁻ /L ST: 365 mg ST/L SST: 43 mg SST/L CT: 3,35 x 10 ⁸ NMP/100mL <i>E. coli</i> : 5,08 x 10 ⁷ NMP/100mL	Eficiências de remoção: DBO: 97% DQO: 93% SST: 94% N. amoniacal: 93% F. solúvel: 93% CT: 1,4 log <i>E. coli</i> : 2,04 log
7	Gomes, 2015 (São Paulo - Brasil)	Cluster / TS + FAN + FAR	20 pessoas / 0,3 m ³ /dia	Tratamento descentralizado do esgoto doméstico gerado por duas residências, uma fábrica de pisos e um bar.	Não houve caracterização do Esgoto Bruto	Eficiências de remoção: Turbidez: 96% SST: 86% DBO: 87% DQO total: 81% DQO solúvel: 68% DQO coloidal: 70% CT: 1 log <i>E. coli</i> : 2 logs

Tabela 3.1 – Resumo dos trabalhos desenvolvidos em ETE descentralizadas, entre 2011 e 2018

Trabalho	Fonte e Local	Tipo / Processo de tratamento	População atendida / Vazão afluente média	Descrição	Caracterização do Esgoto Bruto	Resultados
8	Ribeiro, 2016 (São Paulo - Brasil)	Cluster / UASB + BAS	1.709 pessoas / 222 m³/dia	Avaliação da eficiência de tratamento uma ETE descentralizada.	pH: 6,8 Alcalinidade: 361 mg CaCO ₃ /L AVT: 169 mg/L OD: 1,7 mg O ₂ /L DBO: 711 mg O ₂ /L DQO: 562 mg O ₂ /L NTK: 92 mg N/L N. amoniacal: 59 mg N-NH ₃ /L Nitrito: 0,029 mg/L Nitrito: 15,4 mg/L ST: 1566 mg/L STF: 631 mg/L STV: 935 mg/L SST: 610 mg/L SSF: 72 mg/L SSV: 543 mg/L	Eficiências de remoção: DBO: 87% DQO: 86% ST: 54% SST: 94%
9	Teixeira et al., 2017 (Manaus - Brasil)	Cluster / UASB + LA	Não informado	Avaliação da eficiência de uma ETE descentralizada, que trata os esgotos domésticos gerados por um condomínio residencial.	pH: 7,2 DQO: 290,5 mg O ₂ /L DBO: 233 mg O ₂ /L NTK: 13,2 mg N/L F. total: 5,2 mg P/L ST: 420,6 mg ST/L	Eficiências de remoção: DBO: 80% DQO: 88% ST: 90% NTK: 32% F. total: 35%
10	Teixeira et al., 2017 (Manaus - Brasil)	Cluster / UASB + LA	Não informado	Avaliação da eficiência de uma ETE descentralizada, que trata os esgotos domésticos gerados por um condomínio residencial.	pH: 7,0 DBO: 220,6 mg O ₂ /L DQO: 302,3 mg O ₂ /L ST: 354,5 mg ST/L NTK: 12,6 mg N/L F. total: 5,2 mg P/L	Eficiências de remoção: DBO: 80% DQO: 87% ST: 90% NTK: 33% F. total: 33%

Legenda: FAN: filtro anaeróbio; FAR: filtro de areia; FBMSO: Filtro biológico, com meio suporte orgânico; LA: lodos ativados; RAC: reator anaeróbio compartimentado; S: sumidouro; TS: tanque séptico; WC: *wetlands* construídos; WCFV: *wetlands* construído de fluxo vertical; WCFC+MFS: *wetlands* construído de fluxo vertical modificado com fundo saturado

Fonte: Próprio autor.

Embora todos os trabalhos levantados na Tabela 3.1 tenham sido realizados em escala real, apenas dois simularam a geração de esgotos domésticos por uma residência unifamiliar, onde o esgoto afluyente foi bombeado diretamente da rede de coleta de esgotos para uma ETE em escala real, situadas nas Universidades Federal da Paraíba (SANTOS, 2013) e de São Paulo (MENDONÇA, 2015). Já a maioria dos trabalhos levantados foi realizada em ETE do tipo *cluster*, que tratam os esgotos gerados por condomínios residenciais ou por um agrupamento de casas.

Dentre os trabalhos levantados, apenas o de Garzón-Zuñiga e Buelna (2011) foi realizado em uma ETE que tratava os esgotos gerados em uma unidade de ensino, no México. Nesse trabalho, o esgoto bruto foi caracterizado e avaliou-se o desempenho da ETE durante o período de um ano, nas etapas de partida, operação, férias escolares, nos períodos chuvoso e seco, além da influência da aeração forçada do filtro biológico na qualidade do efluente final. Como principais resultados, foi verificado que o período das férias escolares não provocou o colapso da ETE. Além disso, a operação com a aeração forçada desligada se mostrou viável, apresentado boas eficiências médias de remoção de demanda biológica de oxigênio, demanda química de oxigênio, nitrogênio total, sólidos em suspensão totais, ovos de helmintos e Coliformes Totais. Os autores concluíram que, com uma desinfecção adequada, o reúso da água tratada pode ser aplicado na irrigação ou em bacias sanitárias.

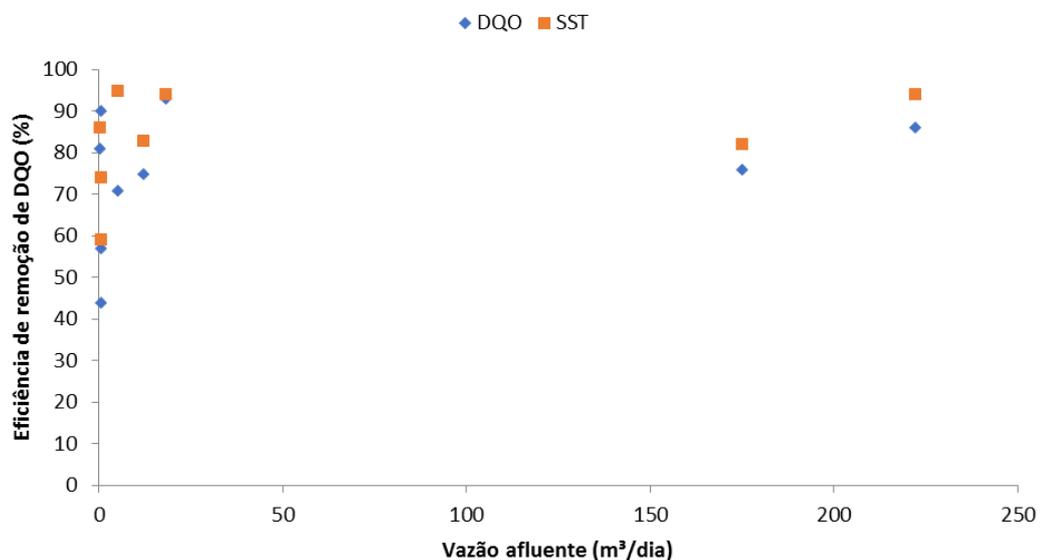
Quando se observa os processos de tratamento empregados nas ETE dos trabalhos avaliados, verifica-se que, em todos, a primeira unidade de tratamento é do tipo anaeróbia, a qual apresenta, em geral, boa capacidade de remoção de matéria orgânica, baixo custo e baixa complexidade operacional. A aplicação desses processos condiz com o conceito das ETE descentralizadas, uma vez que a operação dessas estruturas não deve ser demasiadamente complexa e financeiramente dispendiosa.

Na etapa de polimento do efluente dos reatores anaeróbios, apenas as ETE estudadas nos trabalhos de Garzón-Zuñiga e Buelna (2011), Ribeiro (2016) e Teixeira *et al.* (2017) apresentam processos de tratamento que exigem um sistema de aeração forçada. O emprego desses processos, embora aumente a complexidade e o custo operacional, pode ser vantajoso, principalmente se for desejado remover nitrogênio do esgoto bruto. Contudo, verifica-se que os trabalhos de Ferreira (2013), Mendonça (2015), e Trein (2015), cujas ETE estudadas apresentam WC na etapa de polimento,

apresentaram algum tipo de remoção de nitrogênio total e amoniacal, em alguns casos até superior às ETE com processos de polimento aeróbios.

Quando se compara a vazão afluyente com as eficiências de remoção de DQO e de SST nas ETE, não se observa uma correlação entre as duas variáveis, o que indica que as ETE descentralizadas apresentam aplicabilidade, tanto no atendimento de residências unifamiliares quanto no atendimento de um conjunto de residências. A Figura 3.1 apresenta os resultados.

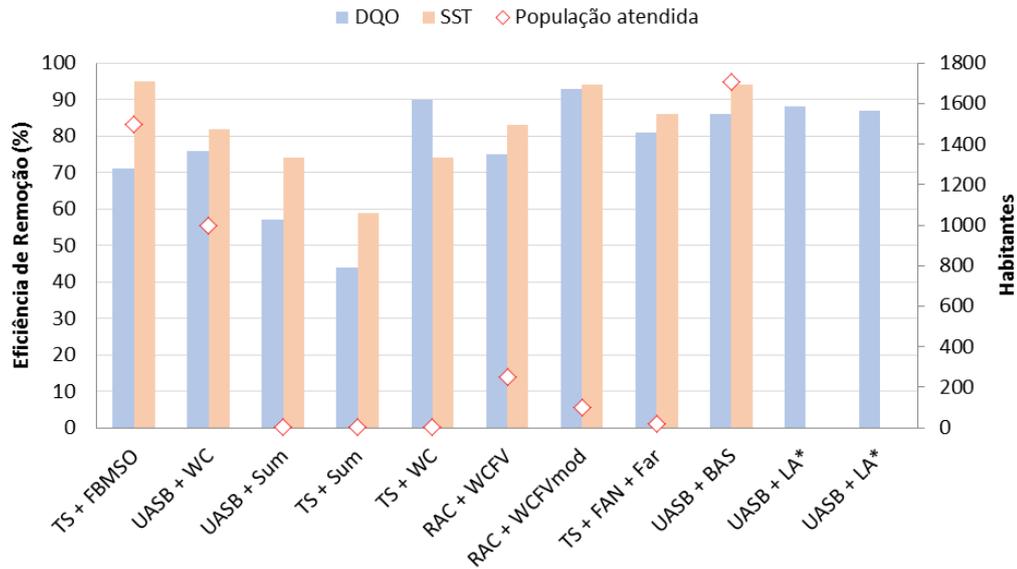
Figura 3.1 – Vazão afluyente (m^3/dia) versus Eficiência de remoção de DQO (%) das ETE dos trabalhos apresentados na Tabela 3.1.



Fonte: Próprio autor.

Ao se avaliar os processos de tratamento empregados e as respectivas eficiências de remoção de DQO e SST, parâmetros relacionados com a matéria orgânica presente no esgoto, verifica-se que as maiores eficiências de remoção de DQO foram dos sistemas TS + WC (4 pessoas) e RAC + WCFVmod (100 pessoas). Já em relação aos SST, as maiores eficiências foram dos sistemas TS+FMSO (1.500 pessoas); RAC + WCFVmod (100 pessoas) e UASB + BAS (1.709 pessoas). Novamente, verifica-se que a população atendida não apresenta influência na eficiência da ETE, mesmo considerando que se tratam de ETE com processos distintos de tratamento. A Figura 3.2 apresenta os resultados.

Figura 3.2 – ETE apresentadas na Tabela 3.1 e respectivas populações atendidas, eficiências de remoção de DQO e SST.



*Eficiência não informada

Fonte: Próprio autor.

Em relação ao reúso da água tratada, nenhuma das ETE dos trabalhos avaliados o realiza. Apenas os trabalhos de Garzón-Zuñiga e Buelna (2011) e Gomes (2015) avaliaram a possibilidade de efetuar o reúso, em virtude do bom desempenho operacional da ETE. Levando-se em conta esses resultados, constata-se a falta de alinhamento dessas estruturas analisadas com o conceito das ETE descentralizadas, as quais devem tratar os esgotos gerados por uma localidade e promover o reúso da água tratada.

Esse fato reforça a afirmação de Capodaglio *et al.* (2017), de que, embora já se tenha um bom nível de conhecimento acerca da implementação e desempenho das ETE descentralizadas, tanto nos níveis técnico e científico, a transferência de tecnologias para o nível prático ainda é insuficiente, em função da persistência do pensamento conservador (*business as usual*) nas esferas institucional e administrativa.

Para o futuro, os principais desafios apontados por Tchobanoglous *et al.* (2004) para a gestão descentralizada de águas residuárias são: promover a proteção da saúde pública e do meio ambiente, superar a má-reputação do baixo desempenho das ETE descentralizadas, desempenhar um papel de destaque no gerenciamento sustentável dos recursos hídricos, ajudar na mudança de paradigma do esgoto, da disposição final do efluente para o reúso da água tratada; e a integração com as ETE centralizadas existentes.

Entretanto, visto que alguns autores destacam a vantagem das ETE descentralizadas em relação à minimização de impactos ambientais (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2004; CAPODAGLIO *et al.*, 2017), e que o atendimento aos requisitos da legislação vigente no Estado da Bahia, apresentada no Quadro 3.1, atualmente é a única forma em que se avalia os impactos ambientais de ETE descentralizadas, também se destacam como desafios futuros a necessidade de se considerar o saneamento voltado para o aproveitamento de recursos – ações voltadas para o aproveitamento de recursos a partir do esgoto e seus subprodutos - e ferramentas de avaliação dos impactos ambientais de escopo mais ampliado, como a Avaliação do Ciclo de Vida.

3.2 O Conceito NEXUS e o saneamento voltado para o aproveitamento de recursos: oportunidades de melhoria do desempenho ambiental das ETE descentralizadas

Atualmente, frente aos eventos de escassez hídrica, de mudanças climáticas e de desequilíbrio do ciclo do nitrogênio e do fósforo, tem se buscado pela concepção de sistemas de tratamento de esgotos alinhados com preceitos da sustentabilidade e mitigação de impactos ambientais. Para uma ETE ser sustentável, do ponto de vista ambiental, a mesma deve garantir a proteção da qualidade do meio ambiente, a conservação de recursos, o reúso da água, assim como a reciclagem de nutrientes (MASSOUD *et al.*, 2009).

Do ponto de vista da saúde humana e da proteção do meio ambiente, os processos de tratamento secundários de esgotos domésticos encontram-se em uma fase amadurecida e são capazes de produzir efluentes com baixas concentrações de carga orgânica e nutrientes (BATSTONE *et al.*, 2015). Embora o atual cenário mundial exija, cada vez mais, o desenvolvimento e a aplicação de processos que causem menos impactos ambientais, o projeto e a operação das Estações de Tratamento de Esgotos ainda são, usualmente, realizados de forma tradicional, da mesma forma com que foram concebidos no século XX, sem considerar importantes aspectos de minimização de impactos ambientais. Assim, de forma a considerar todos os impactos ambientais, econômicos e sociais, deve-se transcender o simples atendimento aos padrões

legislativos de lançamento de efluentes em corpos hídricos (METCALF & EDDY, INC., 2016).

Para Daigger (2009), o uso atual dos recursos naturais segue uma tendência linear, chamada de “*take, make, waste*” (pegue, faça e desperdice), a qual tem se mostrado como uma das principais causas do consumo insustentável de recursos e cuja prática, no setor hídrico, tem levado à ocorrência de eventos de estresse hídrico, consumo insustentável de recursos químicos e energéticos, dispersão de nutrientes no meio aquático e estruturas financeiramente instáveis. Portanto, a prática do tratamento de esgotos deve mudar para uma abordagem de ciclo fechado, baseada na conservação da água e nutrientes (JHANSI e MISHRA, 2013) e no aproveitamento de recursos (PAPA *et al.*, 2017).

Uma dessas abordagens de ciclo fechado, que vai além da visão *take, make, waste*, o Conceito *Nexus WEF* (água – energia – alimento), foi introduzido na Alemanha em 2011 e destina-se a entender e analisar, sistematicamente, todas as interações entre as atividades humanas e o meio ambiente natural, de forma a proporcionar um gerenciamento mais adequado do uso dos recursos naturais, em diferentes setores. Sendo assim, esse conceito descreve os sistemas complexos dos recursos globais, dos quais a sociedade depende para alcançar objetivos sociais, econômicos e ambientais. Permite também identificar oportunidades e realizar planejamentos, tomadas de decisão, implementação, monitoramento e avaliação de forma mais integrada e econômica (FAO, 2014).

Essa mudança de paradigma do esgoto doméstico, de um subproduto das atividades humanas para uma fonte de recursos, tem se dado justamente em razão da radical mudança nos padrões de consumo, do elevado crescimento populacional mundial e da consequente necessidade de adoção de um estilo de vida mais sustentável pela população. Dessa forma, nos últimos anos, o desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento de esgotos tem caminhado em direção ao melhoramento dos processos e reciclagem de recursos (GUEST *et al.*, 2009; GRANT *et al.*, 2012; VAN LOOSDRECHT e BRDJANOVIC, 2014).

Essa tendência mostra-se bastante oportuna, visto que alguns dos limites globais seguros, relacionados com a atividade de tratamento de esgotos, já foram ultrapassados, a exemplo do ciclo do nitrogênio (ROCKSTRÖM *et al.*, 2009). Assim sendo, a visão predominante no século XX do manejo de esgotos domésticos, que

enxergava apenas o que deveria ser removido do esgoto, deve mudar para uma visão mais ampla, que reconhece a necessidade de se recuperar recursos presentes no mesmo, a exemplo de água, bioplásticos, fertilizantes e energia (GUEST *et al.*, 2009). Em outras palavras, a prática do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos mostra-se uma tendência promissora na diminuição dos impactos ambientais associados à operação das ETE.

Uma ETE que desenvolve essa prática pode ser entendida como uma instalação que, além da remoção de carga orgânica, nutrientes e poluentes do esgoto bruto, também aproveita produtos com determinado valor agregado, a partir do próprio esgoto. Segundo Papa *et al.* (2017), nos últimos anos, esse aproveitamento nas ETE tem sido direcionado às energias térmica, elétrica e mecânica, para serem utilizadas dentro da própria instalação, além do aproveitamento de recursos que podem ser comercializados localmente. O desempenho ambiental de uma ETE pode ser melhorado, portanto, por meio da redução do uso de recursos não-renováveis, da minimização de geração de resíduos e da recuperação de recursos (MO e ZHANG, 2013).

De acordo com Wendland (2011), o saneamento voltado para o aproveitamento de recursos consiste de um ótimo exemplo do *Nexus WEF*, uma vez que, a partir de tal prática, é possível recuperar água e energia, proporcionar o uso de uma fonte alternativa de energia - o biogás - e contribuir para a segurança alimentar, no momento em que são obtidos fertilizantes, condicionantes de solo ou irrigação com água de reúso rica em nutrientes para serem aplicados na agricultura.

À luz dessa prática, ao se avaliar as possibilidades de melhoria do desempenho ambiental das ETE descentralizadas, o reúso da água tratada no próprio local de geração pode diminuir o consumo de energia e a consequente pegada de carbono relacionadas com o processo produtivo da água potável, além de reduzir o potencial de eutrofização dos corpos hídricos; o aproveitamento de nutrientes pode evitar o uso de fertilizantes sintéticos, melhorar o ciclo do nitrogênio e diminuir a retirada de fósforo da natureza; e o aproveitamento de energia a partir do biogás produzido pode diminuir os impactos ambientais relacionados com a produção de energia (CORNEJO *et al.* 2016).

Uma outra vantagem das ETE descentralizadas, em relação ao saneamento voltado para o aproveitamento de recursos, é a possibilidade de decidir pela implantação de

tecnologias de segregação de correntes do esgoto na fonte. Do ponto de vista energético, é mais eficiente aproveitar o nitrogênio da própria urina segregada na fonte, do que remover nitrogênio do esgoto doméstico nas ETE (LARSEN *et al.*, 2016).

Diversos estudos estão sendo realizados com o objetivo de viabilizar o aproveitamento de produtos a partir do esgoto e suas correntes, a exemplo da estruvita, dos bioplásticos e dos biopolímeros. A Figura 3.3 mostra alguns desses materiais e o Quadro 3.4 apresenta algumas tecnologias para o aproveitamento integrado de energia, nutrientes e da água de reúso nas ETE.

Figura 3.3 - Materiais que podem ser recuperados a partir dos Esgotos Domésticos e suas correntes: A - estruvita; B - bioplástico de polihidroxialcanoato e C - biopolímeros de alginatos



Fonte: van Loosdrecht e Brdjanovic (2014).

Quadro 3.4 - Tecnologias para o aproveitamento integrado de energia, nutrientes e água de reúso nas ETE

Tecnologia	Descrição	Vantagens	Limitações
Sistemas combinados de geração de calor e energia (CHP)	Utilizam o biogás oriundo de reatores anaeróbios, para gerar calor e eletricidade no local de uso.	Confiabilidade da eletricidade gerada; Evita a emissão direta de biogás no meio ambiente.	Custo elevado de implantação; Requerem elevada produção de biogás; Viável apenas para ETE de grande porte, até o momento;
Incineração de biossólidos	Produzem eletricidade a partir da combustão de biossólidos.	Além de produzir energia, reduz o volume dos resíduos.	Podem liberar poluentes persistentes para o meio ambiente; Inconsistência de qualidade; Investimento elevado de capital; Custo energético elevado para a desidratação dos biossólidos.
Energia Hidrelétrica de efluentes	Produz eletricidade a partir da energia potencial do esgoto, por meio da instalação de turbinas em condutos hidráulicos.	Podem elevar a concentração de oxigênio dissolvido no esgoto tratado.	Requer que o efluente possua energia cinética suficiente para justificar o investimento.

Tecnologia	Descrição	Vantagens	Limitações
Energias solar e eólica	Produzem eletricidade no local, a partir das energias solar e eólica.	Como as ETE estão geralmente afastadas dos centros urbanos, são bons locais para a instalação desses sistemas.	Custo de implantação elevado; As condições de localização e climáticas podem restringir a aplicação.
Bombas de calor	Utilizam a eletricidade para recuperar o calor das águas residuais e para disponibilizar esse calor a temperaturas adequadas.	São muito confiáveis e apresentam baixos custos de operação e manutenção.	O calor não pode ser utilizado em locais muito distantes.
Sistemas bioeletroquímicos	As células de combustível microbianas convertem diretamente a energia do metabolismo microbiano em eletricidade.	Podem reduzir o excesso de lodo em até 20%, comparado com o tratamento convencional e, conseqüentemente, reduzem os custos de disposição final do lodo.	Alto custo de implantação; Aplicados ainda em escala piloto.
Microalgas	Recupera energia a partir do cultivo de microalgas no esgoto.	Reduz a concentração de matéria orgânica e nutrientes.	-
Aplicação direta de biossólidos na agricultura	Aplicação de biossólidos diretamente na superfície do solo, ou em camadas inferiores.	Redução do uso de condicionantes de solo e fertilizantes; Evita a entrada excessiva de nutrientes no ambiente.	Ocorrência de odores; Aceitação dos usuários; Legislação restritiva;
Separação da urina	Separação da urina na fonte para recuperação de nutrientes.	Reduz de forma significativa a carga de nutrientes afluente à ETE; Os nutrientes contidos na urina são mais facilmente aproveitados.	Requer o envolvimento da comunidade local; Possibilidade de contaminação cruzada com as fezes.
Cristalização controlada de estruvita	O método permite a reciclagem de nutrientes, em função da elevada concentração de fósforo, amônia e magnésio.	Apresenta altas taxas de recuperação de nutrientes; É economicamente viável;	Formação indesejada de estruvita pode causar entupimentos nas tubulações e equipamentos; Custo elevado dos reagentes necessários ao melhoramento do magnésio e ajuste do pH;

Tecnologia	Descrição	Vantagens	Limitações
Recuperação de nutrientes por meio de espécies aquáticas	Utilização de espécies aquáticas para captura de nitrogênio, como macroalgas, lentilhas de água, <i>wetlands</i> construídos, raízes etc.	São econômica e energeticamente eficientes, comparado com tecnologias convencionais de tratamento.	Mudanças na temperatura da água e intensidade da luz podem comprometer a taxa de absorção de nutrientes das plantas.
Irrigação agrícola	Aplicação da água de reúso na agricultura.	O reúso da água tratada na agricultura pode aliviar o stress hídrico local; Os nutrientes presentes na água de reúso podem reduzir a quantidade de fertilizante aplicada.	Possibilidade de contaminação do solo e das raízes; Custo elevado de construção e operação do sistema de transporte da água de reúso até os locais de utilização.
Reúso industrial	Utilização da água de reúso na indústria, como água de resfriamento, processos industriais etc.	Promove a redução de custos e promove a sustentabilidade.	Corrosão e crescimento de microrganismos.
Reúso urbano	Utilização da água de reúso para a irrigação de áreas urbanas e usos comerciais, como lavagem de veículos, combate a incêndios etc.	Promove a redução de custos e do estresse hídrico.	Pode requerer um sistema adicional de distribuição de água de reúso; Exposição humana à água de reúso pode causar sérios problemas de saúde pública.
Reúso potável indireto	Recarga de aquíferos e descarga de efluente tratado no próprio corpo hídrico que abastece uma localidade.	Elimina a necessidade de reservatórios de superfície e seus problemas, como perdas por evaporação, proliferação de algas e odores.	Altos custos para tratamento; Necessidade de monitoramento da qualidade da água; Necessidade de instalações específicas para injeção e infiltração da água de reúso.
Reúso potável direto	Introdução da água de reúso diretamente no sistema de distribuição de água.	Não requer um sistema adicional para distribuição da água de reúso; A aceitação da tecnologia pela população ainda é uma barreira.	Os custos operacionais podem ser elevados, em função dos requisitos para o tratamento.

Fonte: Adaptado de Mo e Zhang (2013).

Como listado acima, existem diversas tecnologias disponíveis para o aproveitamento de recursos nas ETE, em distintos níveis de avanço tecnológico. Apesar de representarem, à primeira vista, melhorias ambientais na operação dessas

instalações, uma vez que reinserem na cadeia produtiva recursos que seriam descartados no meio ambiente juntamente com o efluente final tratado, deve-se avaliar se a aplicação dessas tecnologias pode representar, também, melhorias ambientais ao longo de todo o ciclo de vida operacional da ETE.

3.3 A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta de avaliação do desempenho ambiental de ETE descentralizadas

A ACV se configura como uma ferramenta padronizada para compilar e avaliar as entradas, saídas e os potenciais impactos ambientais de um produto ou serviço, ao longo do seu ciclo de vida. Essa técnica avalia os impactos ambientais de um produto, desde a extração dos materiais de produção até a disposição final, também chamada de visão “do berço ao túmulo”. A execução dos estudos de ACV é normatizada pelas Normas ISO 14.040/2009 e 14.044/2009 e permite identificar oportunidades para melhorar o desempenho ambiental dos produtos; auxiliar tomadores de decisão; selecionar indicadores relevantes de desempenho ambiental e agregar valor ambiental ao produto (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

Apesar dos benefícios diretos proporcionados pelas ETE, existem impactos ambientais adversos relacionados com o seu ciclo de vida, em função, por exemplo, do consumo de materiais e de energia, das emissões para o ambiente e do lodo gerado. Tais impactos não devem superar os benefícios proporcionados pelas ETE (ZANG *et al.*, 2015). Portanto, dada a abordagem ampliada da ACV, é possível identificar não somente os impactos ambientais associados à operação das ETE descentralizadas, como também calcular os impactos ambientais de cenários operacionais onde a prática do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos seja aplicada.

A ACV começou a ser aplicada ao tratamento de esgotos na década de 1990 com diferentes objetivos, como: identificar os principais contribuintes de impactos dentro de processos específicos, comparar diferentes tecnologias e/ou instalações e avaliar as metodologias da ferramenta ACV e sua influência na avaliação dos impactos (HOSPIDO *et al.*, 2004; GALLEGU *et al.*, 2008; RENOU *et al.*, 2008; FOLEY *et al.*, 2010; COROMINAS *et al.*, 2013).

O estudo pioneiro de ACV aplicado a ETE foi realizado por Emmerson *et al.* (1995), o qual teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental de três ETE descentralizadas e compactas situadas na Inglaterra, uma com processo de lodos ativados e duas com filtros biológicos, que atendem cerca de 1.000 habitantes. Foram avaliados os potenciais impactos ao longo de todo o ciclo de vida da estrutura – construção, operação e operação. Como principais resultados, as ETE com filtros biológicos produziram cerca de 35% menos emissões atmosféricas do que aquela com os lodos ativados. A fase operacional foi a principal responsável pelos impactos de emissão de dióxido de carbono na ETE com lodos ativados. Já nas ETE com filtros biológicos, a fase de construção foi a maior responsável por essas emissões.

Desde então, muitos estudos de ACV de ETE, com distintos objetivos, vem sendo desenvolvidos. O Quadro 3.5 apresenta o resumo de alguns desses estudos.

Quadro 3.5 – Resumo de alguns trabalhos de ACV em sistemas de tratamento de esgoto

Trabalho	Referência / Local	Objetivo	Processo de tratamento	Fase operacional	Software / Método(s) de AICV	Unidade funcional	Categorias de impacto (<i>midpoint</i>)	Resultados
1	Li <i>et al.</i> (2013) - China	Avaliar o desempenho ambiental de uma ETE centralizada, em comparação com outros processos de tratamento.	ETE centralizada: <i>wetlands</i> construídos; Outros processos de tratamento: Reator de processo anaeróbico / anóxico / óxico, um filtro de areia e tratamento químico do lodo com poliacrilamida.	Construção e operação	SimaPro 7.0 / CML Baseline 2000	O tratamento de 10 ⁵ m ³ /dia de esgoto, ao longo de 50 anos.	AC, AG, DA, ET, EU e OF.	O consumo de energia elétrica da ETE de Kunshan foi o maior responsável pelo elevado impacto nas categorias DA (91%), AG (94,9%), FOF (88,8%) e AC (78,9%), devido à matriz energética que abastece a ETE - o carvão. Os resultados da comparação entre a ETE abastecida com carvão, da simulação da ETE abastecida com energia eólica, dos <i>wetlands</i> construídos e do <i>bardenpho</i> simulado, sinalizaram que os <i>wetlands</i> construídos apresentaram maior impacto nas categorias AC, AG e DA, em função do elevado consumo energético e da baixa eficiência do tratamento. Já a simulação da ETE abastecida com energia eólica apresentou significativa redução dos impactos, o que permitiu evidenciar que, quando energias renováveis são levadas em conta, os impactos ambientais diminuem com o aumento da qualidade do efluente.
2	Lopes (2014) - Brasil	Avaliação dos potenciais impactos ambientais associados à fase de construção e operação da ETE.	ETE descentralizada: <i>Wetlands</i> construídos de fluxo sub-superficial.	Construção e operação	SimaPro® / CML - IA (baseline)	1 m ³ de esgoto tratado.	AC, AG, DA e EU.	Na fase de construção, a fôrma em madeira foi responsável por mais de 70% dos impactos nas categorias AG, AC e EU. Já na categoria AG, o aço foi o principal responsável pelo impacto total. Na fase de operação, o hipoclorito de sódio foi responsável por quase 100% dos impactos na categoria DA; na categoria AC, o hipoclorito de sódio foi responsável por mais de 95% dos impactos. Já nas categorias AG e EU, o efluente final tratado foi o principal responsável pelos impactos. Ao se comparar as fases de construção e operação, a fase de operação

Trabalho	Referência / Local	Objetivo	Processo de tratamento	Fase operacional	Software / Método(s) de AICV	Unidade funcional	Categorias de impacto (<i>midpoint</i>)	Resultados
								apresentou maior potencial de impacto em todas as categorias consideradas. Ao se normalizar todos os dados, a Eutrofização foi a categoria de maior potencial de impacto da ETE.
3	Gutierrez (2014) - Brasil	Avaliar o desempenho ambiental de dois sistemas simplificados de tratamento de esgotos, considerando duas opções de gestão dos subprodutos gerados.	UASB e <i>wetlands</i> construídos / UASB + Filtro Biológico Percolador.	Operação	SimaPro / ReCiPe, CED	1 m ³ de esgoto tratado.	AC, DCO, EAD, EU, FOF, MC e TH.	A opção de tratamento dos subprodutos flare + aterro apresentou os maiores impactos de ciclo de vida, em quase todas as categorias de impacto analisadas, ao se comparar com a opção de caldeira + biofertilizante.
4	Alves (2016) - Brasil	Avaliar os impactos de ciclo de vida de uma ETE composta por <i>wetlands</i> construídos de fluxo vertical	ETE descentralizada: <i>Wetlands</i> construídos de fluxo vertical	Construção e operação	SimaPro® 8 / ReCiPe, CML, CED.	1 m ³ de esgoto tratado.	AG, EUM, EUA, TH, EM, EAD, CED e FOF.	Na fase de construção, ao se normalizar os resultados, as categorias que apresentaram os maiores impactos foram a EAD e ETM. Os materiais de construção que mais contribuíram para os impactos nas categorias analisadas foram o aço, tijolo e o cimento. Na operação, na categoria de MC, o metano foi responsável por mais de 90% dos impactos; na categoria de EU, o fósforo e o nitrogênio foram responsáveis por mais de 90% dos impactos; na categoria de FOF, o metano foi responsável por quase 100% dos impactos. Também foi verificado que a energia consumida na ETE, quando comparada com o efluente tratado, contribui com quase a totalidade dos impactos em todas as categorias avaliadas.

Trabalho	Referência / Local	Objetivo	Processo de tratamento	Fase operacional	Software / Método(s) de AICV	Unidade funcional	Categorias de impacto (<i>midpoint</i>)	Resultados
5	Kramer (2016) – Brasil	Avaliar o desempenho ambiental de uma ETE, considerando a presença de contaminantes emergentes.	ETE centralizada: Lodos ativados + Decantador secundário.	Construção e operação	SimaPro® / TRACI e USEtox	1 m ³ de esgoto tratado.	EU, TAD e TH.	Na categoria EU, o tratamento do efluente foi responsável por 90% dos impactos. As principais substâncias responsáveis pelos impactos foram o nitrogênio amoniacal e o ortofosfato. Na categoria de TH não cancerígena, o tratamento do efluente também foi responsável por quase 50% dos impactos; nas categorias TH cancerígena e EAD, o tratamento de efluente também foi responsável pela maior parte dos impactos. Foi verificado que quando são considerados os contaminantes emergentes no inventário, a diferença entre a magnitude dos impactos é de mais de 200%. Também foram comparados os dados reais com o <i>dataset</i> de ETE presente no software, onde se observou que os impactos do <i>dataset</i> foram inferiores aos impactos da ETE com dados reais.
6	Opher e Friedler (2016) – Israel	Comparar as consequências da implantação de quatro políticas de gestão dos esgotos. 0 - ETE centralizada; 1 - ETE centralizada com reúso; 2 - ETE descentralizada do tipo <i>cluster</i> , com reúso e segregação das águas cinzas e negras; 3 - ETE descentralizada do tipo on-site, com reúso e segregação das águas cinzas e negras.	ETE descentralizada: Lodos ativados + tratamento terciário.	Operação	SimaPro® / ReCiPe Midpoint, v. 1.07	Água fornecida, recuperada e reutilizada no período de 1 ano.	ACT, DF, DM, DRH, ETAD, ETM, EUA, EUM, FOF, MC, MP e TH.	O cenário 0 apresentou os maiores impactos, em todas as categorias. Os impactos reduziram pelo menos 17% no cenário 1, em relação ao cenário 0. Os resultados indicaram que o cenário 2 apresentou menores impactos em quase todas as categorias de impacto.

Trabalho	Referência / Local	Objetivo	Processo de tratamento	Fase operacional	Software / Método(s) de AICV	Unidade funcional	Categorias de impacto (<i>midpoint</i>)	Resultados
7	Garfi <i>et al.</i> (2017) - Espanha	Comparar os impactos ambientais de três alternativas de tratamento de esgoto produzido por pequenas populações: lodos ativados com aeração estendida, <i>wetlands</i> construídos e sistemas de lagoas de alta taxa.	ETE descentralizada: Lodos ativados / <i>wetlands</i> construídos e sistemas de lagoas de estabilização de alta taxa.	Construção e operação	SimaPro® 8 / ReCiPe	1 m³ de esgoto tratado.	ACT, DF, DM, DO, EUA, EUM e MC.	Lodos ativados apresentaram impactos de 2 a 5 vezes maior que as outras tecnologias. O maior impacto está associado à fase operacional dos lodos ativados. Sistemas naturais de tratamento requerem uma quantidade grande de matéria prima para a sua construção, o que eleva os impactos nessa fase.
8	Pituco (2017) - Portugal	Avaliar o desempenho ambiental de uma ETE urbana.	ETE centralizada: Decantadores primários, seguidos por sistema de lodos ativados. O lodo produzido é submetido a digestores anaeróbios.	Operação	GaBi 6.0 / CML 2001	1 m³ de esgoto afluente.	AC, AG, EAD, ETT, EU, FOF e TH.	Nos impactos da linha líquida da ETE, as emissões de gases estufa foram as principais contribuintes dos impactos na categoria AG. Na categoria EU, o descarte do efluente final foi responsável por 97% dos impactos. Já nas categorias relacionadas à toxicidade e ecotoxicidade, o consumo de eletricidade foi o principal contribuinte.
9	Buonocore <i>et al.</i> (2018) - Itália	Avaliar os ganhos ambientais obtidos por meio da aplicação de tecnologias de aproveitamento de recursos do esgoto e do lodo.	ETE centralizada: Lodos ativados	Construção e operação	Software não informado / ReCiPe	1000 m³ de esgoto tratado	AG, ACT, DF, EUA, FOF, MP e TH.	O cenário onde era proposto o maior aproveitamento de recursos apresentou menores impactos de ciclo de vida, em todas as categorias analisadas. Ao se normalizar os resultados, a Eutrofização da água doce foi a categoria com maior impacto em todos os cenários propostos.
10	Shi <i>et al.</i> (2018) - China	Avaliar o desempenho ambiental de sete banheiros individuais, com distintos níveis de aproveitamento de recursos.	-	Construção e operação	Gabi 8.0 / CML 2001	Excretas produzidas em um dia por 780 mulheres e 800 homens.	AC, AG, DA, DA fóssil, DCO, EAD, ETM, EU, FOF, TH e TT.	Todos os cenários onde foi proposto o aproveitamento de recursos a partir das excretas humanas apresentaram melhor desempenho ambiental que o cenário convencional.

AC - acidificação; ACT - Acidificação terrestre; AG - aquecimento global; CA – Carcinogênico; DA - depleção abiótica; DCO - depleção da camada de ozônio; DF - Depleção fóssil; DM - Depleção de metais; DRH - Depleção de recursos hídricos; EAD - ecotoxicidade da água doce; EH - ecotoxicidade humana; ET - ecotoxicidade; ETM - ecotoxicidade marinha; ETT - ecotoxicidade terrestre; EU - eutrofização; EUA - eutrofização de água doce; EUM - eutrofização marinha; EUT - eutrofização terrestre; FFO - formação de foto oxidantes; FOF - formação de oxidante fotoquímico; IR – inorgânicos respiratórios; MC - mudanças climáticas; MCF – minerais e combustíveis fósseis; MP - materiais particulados; OF - oxidação fotoquímica; QEC – Qualidade do Ecossistema; R – recursos; SH – saúde humana; TA - toxicidade aquática; TAD - toxicidade da água doce; TH - toxicidade humana; TT - toxicidade terrestre; UT – uso da terra.

Fonte: Próprio autor.

Ao se analisar os trabalhos levantados, observa-se a vasta aplicabilidade da ACV em distintas realidades do tratamento de esgotos, visto que foram realizados estudos em ETE centralizadas (LI *et al.*, 2013; KRAMER, 2016; PITUCO, 2017 e BUONOCORE *et al.*, 2018), descentralizadas (LOPES, 2014; ALVES, 2016; OPHER e FRIEDLER, 2016 e GARFÍ *et al.*, 2017) e até em banheiros individuais (SHI *et al.*, 2018).

Em relação ao método escolhido para a avaliação dos impactos, há um equilíbrio entre a escolha do método CML, que foi adotado por 5 trabalhos, e o método ReCiPe, também adotado em cinco trabalhos. Quanto ao software, o mais utilizado foi o SimaPro[®], tendo sido utilizado em sete trabalhos.

Em relação à delimitação da fronteira do sistema, 70% dos trabalhos considerou as etapas de construção e operação no inventário de ciclo de vida. Já a unidade funcional mais escolhida foi o volume de esgoto tratado, ao longo do ciclo de vida.

É possível inferir também que a Eutrofização é uma das categorias mais relevantes nos estudos de ACV de ETE, uma vez que apresentou maior impacto nos estudos de Lopes (2014) e Buonocore *et al.* (2018), em função da disposição do efluente final no meio ambiente. Também verifica-se que as tecnologias que demandam o fornecimento de aeração forçada, como os lodos ativados, apresentam impacto 2 a 5 vezes maior que outras tecnologias (GARFÍ *et al.*, 2017).

Verifica-se também que o consumo de energia na ETE é uma entrada que representa elevado impacto de ciclo de vida na operação da ETE. No estudo de Alves (2016), a energia consumida contribuiu com quase a totalidade dos impactos em quase todas as categorias avaliadas. Contudo, o trabalho de Li *et al.* (2013) destaca que o emprego de energias limpas para abastecimento da ETE pode diminuir esses impactos.

O estudo de Kramer (2016), ao realizar uma caracterização mais ampla do efluente final, considerando as concentrações de contaminantes emergentes, verificou que a diferença entre os inventários, considerando ou não esses poluentes, é de mais de 200%. Dessa forma, sob a ótica da ACV, os impactos associados à operação de uma ETE podem ser diretamente proporcionais ao nível de refinamento da caracterização do efluente final.

Em relação ao saneamento voltado para o aproveitamento de recursos, apenas os trabalhos de Gutierrez (2014), Opher e Friedler (2016), Buonocore *et al.* (2018) e Shi *et al.* (2018) analisaram os impactos ambientais de ciclo de vida das ETE,

considerando essa prática. Em todos eles, nos cenários onde foram propostos fluxos mais circulares de recursos, foram observadas diminuições dos impactos de ciclo de vida, em relação ao cenário convencional de operação. Entretanto, apenas o trabalho de Opher e Friedler (2016) foi realizado em uma ETE descentralizada. Dessa forma, destaca-se a importância de se realizar mais estudos em ETE descentralizadas, operando em escala real, considerando essa prática.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição geral da pesquisa

A pesquisa realizada avaliou o desempenho ambiental, por meio da avaliação do ciclo de vida, da fase operacional de uma ETE que trata os esgotos gerados por uma instituição de ensino, cuja concepção original consiste de uma combinação de processos de tratamento anaeróbio / aeróbio. Contudo, uma vez que processos aeróbios de tratamento demandam um elevado gasto energético e que a combinação de processos anaeróbios pode apresentar boas eficiências no tratamento de esgotos, desligou-se o sistema de aeração da unidade aeróbia, de forma que a mesma passasse a operar como um filtro anaeróbio e, assim, fosse possível comparar o desempenho ambiental das duas configurações.

Além disso, também foram avaliados os desempenhos ambientais de cenários hipotéticos, nos quais foram propostos ganhos ambientais por meio da prática do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos, de forma que os resultados possam ser úteis em processos de tomada de decisão, ainda na etapa de projeto. Tais avaliações são de grande relevância, uma vez que, no Estado da Bahia, o desempenho ambiental de ETE é condicionado ao atendimento dos requisitos descritos pela Resolução CONAMA 430/2011 e, portanto, não leva em consideração uma visão ampliada dos impactos ambientais ocorridos ao longo do ciclo de vida operacional da instalação.

4.2 Descrição da ETE

A ETE que foi objeto de estudo situa-se na cidade de Salvador, Bahia, próximo à Avenida Luís Viana, nas coordenadas 12°56'9,23" S e 38°24'4,98" O, e tem como função tratar os esgotos gerados por uma instituição de ensino privada, com população flutuante aproximada de 1.500 estudantes e 82 funcionários (ORIGINAL AMBIENTAL LTDA., 2014). Na unidade, além das atividades escolares, há o funcionamento de um teatro. A Figura 4.1 mostra o mapa de localização da ETE.

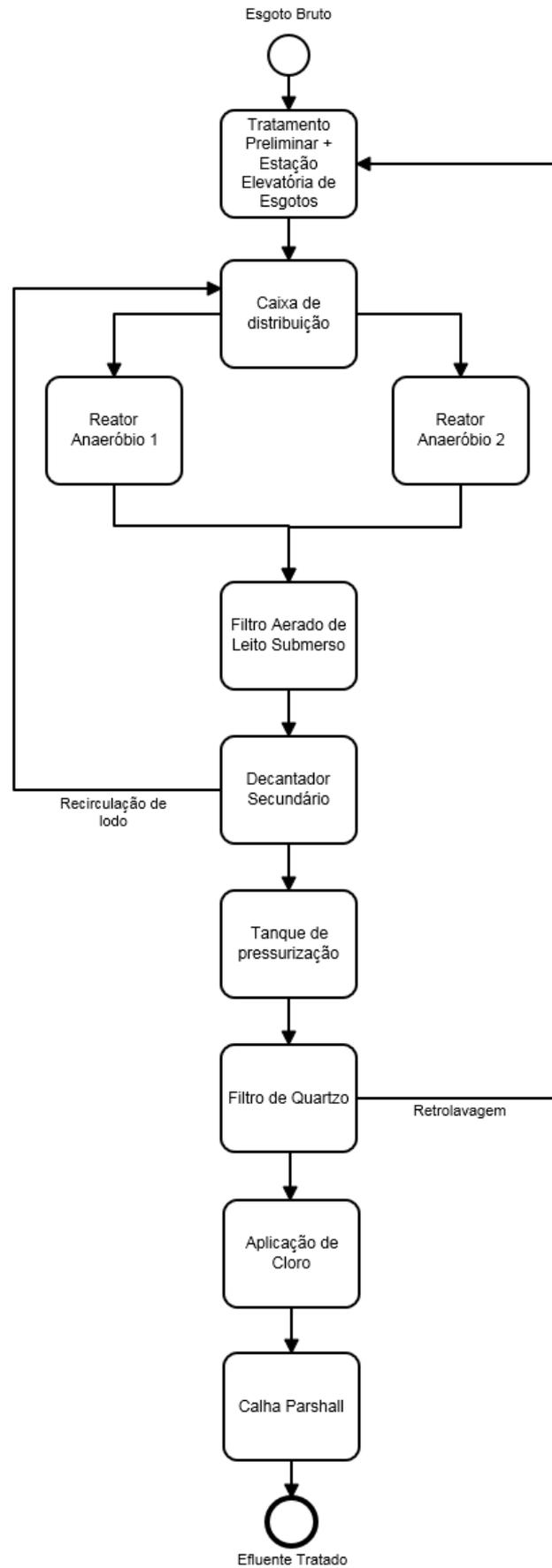
Figura 4.1 – Mapa de localização da ETE



Fonte: Adaptado de Google Earth® (2017).

A ETE foi projetada para tratar uma vazão média de esgotos de 80 m³/dia, por meio de um processo combinado anaeróbio/aeróbio, para atender às condições e padrões para o lançamento direto de efluentes estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011. A operação da ETE foi iniciada no ano de 2015 e é realizada por uma empresa privada. Com exceção do filtro de areia, todos os reatores são construídos em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV). A Figura 4.2 mostra o fluxograma dos processos de tratamento da ETE e a Tabela 4.1 apresenta um resumo das principais características das unidades de tratamento.

Figura 4.2 - Fluxograma da ETE



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.1 - Resumo das unidades de tratamento da ETE

Etapa de tratamento	Especificações	Altura útil (m)	Volume útil (m ³)	Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) teórico
Gradeamento + caixa de areia + estação elevatória de esgoto	Grades grossas, com espaçamento de 4 cm; caixa de areia circular; duas bombas submersíveis	-	-	-
Reator anaeróbio 1	Reator em PRFV	2,5	14,5	8 horas
Reator anaeróbio 2	Reator em PRFV	2,5	14,5	8 horas
Filtro aerado de leito submerso	Reator em PRFV, preenchido com elementos plásticos	-	10,0	1,4 horas
Decantador secundário	Reator em PRFV	-	7,5	1,4 horas
Tanque de pressurização	Reator em PRFV	-	2,0	30 minutos
Filtro de quartzo	-	-	-	-
Tanque de desinfecção	Reator em PRFV	-	2,0	30 minutos

Fonte: Original Ambiental Ltda. (2014).

O esgoto produzido na unidade escolar é encaminhado a um poço de visita e segue, então, para uma estação elevatória de esgotos (EEE), do tipo circular, com tratamento preliminar integrado, constituído por grades, com espaçamento entre as barras de 40 mm, e caixa de areia. O conjunto elevatório é composto por duas bombas submersíveis, que operam alternadamente.

Após o poço de sucção atingir o nível máximo, controlado por um regulador de nível do tipo bóia, o esgoto é recalcado para uma caixa divisora de fluxo, de volume total de 0,5 m³, que divide igualmente o esgoto bruto e o lodo recirculado para dois reatores anaeróbios que operam em paralelo, de volume útil de 14,5 m³ cada. Cada reator anaeróbio possui três pontos de coleta de lodo. O tempo de detenção hidráulica adotado no projeto dos reatores anaeróbios foi de 8 horas, para a vazão média de projeto.

O efluente dos reatores anaeróbios segue, então, para um filtro aerado de leito submerso (FAS) de fluxo ascendente, com meio suporte estruturado de material plástico, do tipo *biorring*, seguido de um decantador secundário (DS) convencional. O sistema de aeração é composto por 2 compressores de ar de 3 Hp de potência que operam alternadamente. O tempo de detenção hidráulica, para a vazão média, foi projetado para 1,4 horas.

O efluente do decantador secundário é conduzido a um tanque de pressurização, de volume de 2 m³, de onde é bombeado para um filtro, cujo leito é preenchido com areia.

Posteriormente, o efluente do filtro é encaminhado para um tanque de aplicação de cloro, também de 2 m³ de volume, para a desinfecção do efluente final, no qual a solução de hipoclorito de sódio é adicionada por meio de uma bomba dosadora. Em seguida, o efluente é encaminhado para uma calha Parshall e, após esse ponto, é considerado tratado e segue então para a disposição final em um corpo hídrico adjacente. A Figura 4.3 apresenta as unidades constituintes da ETE.

Figura 4.3 – Unidades constituintes da ETE: a) Caixa distribuidora de vazão, seguida por dois reatores anaeróbios em paralelo; b) Filtro aerado de leito submerso, decantador secundário, tanques de pressurização e de cloração.



Fonte: Próprio autor.

4.3 Descrição do monitoramento

Durante o estudo, ocorreram duas etapas de monitoramento, nas quais, o período compreendido entre os dias 11/07/2017 e 29/08/2017, convencionou-se denominar por fase 1, na qual a ETE funcionou como um sistema combinado anaeróbio / aeróbio, e o período compreendido entre os dias 04/09/2017 e 04/12/2017, por fase 2, na qual o sistema de aeração forçada do FAS foi desligado e a ETE passou a operar como um sistema combinado anaeróbio / anaeróbio.

A medição da vazão de esgoto afluente à ETE iniciou-se no dia 06 de junho de 2017 e foi realizada por meio de um medidor de vazão da marca Incontrol®, modelo ITS 2000, instalado na calha Parshall da ETE. Os dados foram coletados e registrados a cada cinco minutos em um *datalogger* LogBox-AA da marca Novus®, o que gerou um total de 288 registros por dia.

Já o monitoramento dos parâmetros físico-químicos do efluente final da ETE foi realizado entre os dias 11/07/2017 e 04/12/2017, com campanhas de coleta semanais realizadas às segundas ou às terças-feiras, das 09:30 às 15:30. As amostras coletadas do efluente final foram compostas por alíquotas de efluente proporcionais à vazão afluyente à ETE, obedecendo a intervalos de uma hora, com o intuito de levar em consideração a variabilidade qualitativa dos efluentes ao longo do dia. O ponto de amostragem do efluente final é apresentado na Figura 4.4- a.

Figura 4.4 - Ponto de amostragem: a) referente ao efluente final tratado; b) lodo do reator anaeróbio 1



Fonte: Próprio autor.

Para a composição da amostra, foi utilizado um recipiente plástico de cinco litros, o qual foi devidamente refrigerado com gelo em uma caixa de isopor. Ao término de cada campanha, a amostra final era encaminhada aos laboratórios da *Mérieux Nutrisciences Brasil* Ltda. e de Resíduos e Efluentes, da Escola Politécnica da UFBA.

Já o monitoramento do lodo dos reatores anaeróbios 1 e 2 foi realizado quinzenalmente, com amostras simples coletadas em cada ponto de amostragem. Não foi possível identificar as alturas de cada ponto em relação ao fundo do reator, devido à ausência de informações no projeto da ETE. Dessa forma, denominou-se cada ponto por Altura 1, 2 e 3, em que a Altura 1 representa o ponto mais próximo ao fundo do reator e a Altura 3 o mais distante. Os pontos de amostragem do reator anaeróbio 1 estão apresentados na Figura 4.4 - b, que são similares aos pontos do reator anaeróbio 2.

Os parâmetros físico-químicos monitorados nos supracitados pontos de amostragem foram: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal, fósforo total, sólidos em

suspensão totais (SST) e sulfato. No lodo dos reatores anaeróbios, monitoraram-se os sólidos totais, sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis, apenas.

Parte das análises físico-químicas foi realizada no Laboratório de Resíduos e Efluentes, da Escola Politécnica da UFBA, seguindo as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 2017). A outra parte foi encaminhada para a *Mérieux NutriSciences Brasil* Ltda. O Quadro 4.1 mostra os métodos utilizados para a determinação de cada parâmetro.

Quadro 4.1 – Parâmetros analisados e respectivos métodos

Parâmetro	Método	Local de análise
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Método 5210 B	2
Demanda Química de Oxigênio (DQO) Total	Método 5220 D – Colorimétrico (Refluxo fechado)	1
Fósforo Total	Método 4500-P C	2
Nitrogênio Total Kjeldahl, (NTK)	Método 4500 B	1
Nitrogênio Amoniacal	Método 4500-NH ₃ C	1
Série de sólidos totais	Método 2540 B	1
Série de sólidos suspensos	Método 2540 D	1
Sulfato	EPA 300.0: 1993, 300.1: 1999, POP PA 032 - Rev. 12	2

(1) Laboratório de Resíduos e Efluentes da Escola Politécnica da UFBA.

(2) Mérieux NutriSciences Brasil Ltda.

Fonte: APHA, AWWA, WEF (2017).

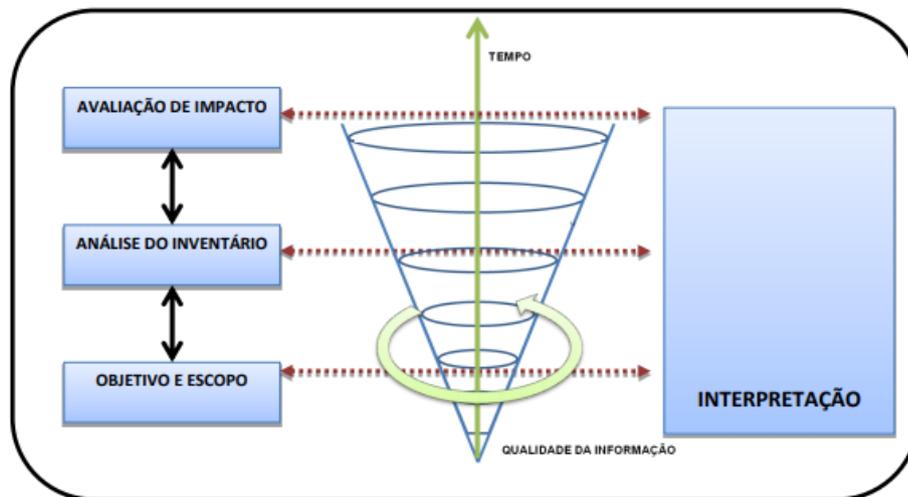
Para a caracterização qualitativa do efluente final tratado, foram calculadas as médias aritméticas das concentrações dos parâmetros avaliados em cada fase de monitoramento. A vazão afluente de esgotos, a ser considerada nos cálculos dos inventários de ciclo de vida, foi calculada por meio da média aritmética de todos os valores de vazão registrados, ao longo do período da pesquisa.

4.4 Análise do Desempenho Ambiental por meio da Avaliação de Ciclo de Vida

Para a análise do desempenho ambiental dos distintos cenários operacionais da ETE, utilizou-se a ACV por meio da aplicação da metodologia descrita pela série de normas ISO 14.040/2009 e 14.044/2009, as quais definem que o estudo deve apresentar as etapas de definição de objetivo e escopo, análise do inventário do ciclo de vida, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). O modelo aplicado no estudo foi a ACV atribucional, que apresenta o fluxo do sistema atribuído a uma quantidade específica da unidade funcional.

Além da metodologia proposta pela série de normas ISO 14.040/2009 e 14.044/2009, adotou-se também a metodologia do cone invertido (KIPERSTOK *et al.*, 2009 apud SOUSA, 2014), a qual apresenta natureza iterativa, ou seja, à medida que novas informações sobre o objeto de estudo são obtidas e novas verificações tornam-se necessárias, são realizadas novas rodadas no software de ACV, com o objetivo de melhorar a análise. A Figura 4.5 apresenta o desenho esquemático dessa metodologia.

Figura 4.5 – Metodologia do cone invertido



Fonte: KIPERSTOK *et al.*, 2009 apud SOUSA, 2014.

Em relação aos cenários operacionais, foram analisados o desempenho ambiental de dois cenários reais, referentes às fases 1 e 2 de monitoramento, respectivamente, e de outros seis cenários hipotéticos, os quais foram compilados baseados em possíveis ganhos ambientais, proporcionados pela prática do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos. O Quadro 4.2 apresenta a descrição desses cenários.

Quadro 4.2 – Resumo dos cenários de operação da ETE

Cenário	Tipo	Descrição
Cenário 1	Real	Referente à fase 1 de monitoramento da ETE, cuja configuração consistiu de dois reatores anaeróbios operando em paralelo, seguidos de filtro aerado de leito submerso, decantador secundário, filtro de areia e desinfecção do efluente final com solução de hipoclorito de sódio.
Cenário 2	Hipotético	Cenário 1 + aproveitamento do biogás produzido nos reatores anaeróbios para produção de energia elétrica a ser utilizada na própria ETE.
Cenário 3	Hipotético	Cenário 2 + produção de efluente final com características típicas reportadas na literatura, com remoção de 70% do nitrogênio amoniacal no FAS.
Cenário 4	Hipotético	Cenário 3 + reúso de 58% da água tratada nas descargas das bacias sanitárias da instituição, com desinfecção do efluente final com solução de hipoclorito de sódio.

Cenário 5	Hipotético	Cenário 3 + reúso de 58% da água tratada nas descargas das bacias sanitárias da instituição, com desinfecção do efluente final com lâmpadas ultravioleta.
Cenário 6	Real	Referente à fase 2 de monitoramento da ETE, cuja configuração consistiu de dois reatores anaeróbios operando em paralelo, seguidos por filtro anaeróbio (FAN), decantador secundário, filtro de areia e desinfecção do efluente final com solução de hipoclorito de sódio.
Cenário 7	Hipotético	Cenário 6 + aproveitamento do biogás produzido nos reatores anaeróbios para produção de energia elétrica a ser utilizada na própria ETE.
Cenário 8	Hipotético	Cenário 7 + reúso de 100% da água tratada na irrigação de áreas verdes da instituição, com desinfecção do efluente final com solução de hipoclorito de sódio.

Fonte: Próprio autor.

De forma a atender a estrutura recomendada para estudos de ACV, conforme as normas ISO 14.040/2009 e 14.044/2009, são descritos aqui o objetivo e o escopo, a metodologia para a construção dos Inventários de Ciclo de Vida (ICV) de cada cenário e a seleção dos métodos utilizados na avaliação dos impactos de ciclo de vida.

4.4.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo da realização da ACV nesse estudo foi avaliar os potenciais impactos de ciclo de vida, associados com os distintos cenários de operação de uma ETE de pequeno porte, que trata os esgotos gerados por uma unidade de ensino. As principais razões para a execução do estudo residem no fato de que se torna necessário analisar, não somente o desempenho da ETE no atendimento aos padrões descritos pela legislação pertinente, como também avaliar os potenciais impactos ao longo do seu ciclo de vida operacional. Além disso, deve-se avaliar os possíveis ganhos ambientais, no momento em que se considera cenários operacionais onde se realiza a prática do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos.

4.4.1.1 Público alvo

O público alvo desse estudo destina-se, sobretudo, à comunidade acadêmica, tomadores de decisão, técnicos e profissionais envolvidos no campo do tratamento de esgotos, que estejam interessados na perspectiva do ciclo de vida de ETE.

4.4.1.2 Sistema estudado

O sistema estudado foi uma estação de tratamento de esgotos descentralizada, composta por reatores anaeróbios, filtro aerado de leito submerso, decantador

secundário, filtro de areia e desinfecção realizada com hipoclorito de sódio, que trata os esgotos gerados por uma instituição de ensino.

4.4.1.3 Função do sistema

A função do sistema estudado é tratar os esgotos gerados em uma instituição de ensino, de forma a atender aos padrões para lançamento de efluentes em corpos hídricos, descritos na Resolução CONAMA 430/2011.

4.4.1.4 Unidade Funcional

Definiu-se, como unidade funcional do estudo, 1 m³ de esgoto tratado ao longo de um período operacional de 20 anos, pois a revisão crítica da literatura realizada por Lopes *et al.* (2017) mostrou que a maioria dos trabalhos recomenda a adoção dessa unidade, quando o estudo é realizado com base em dados reais.

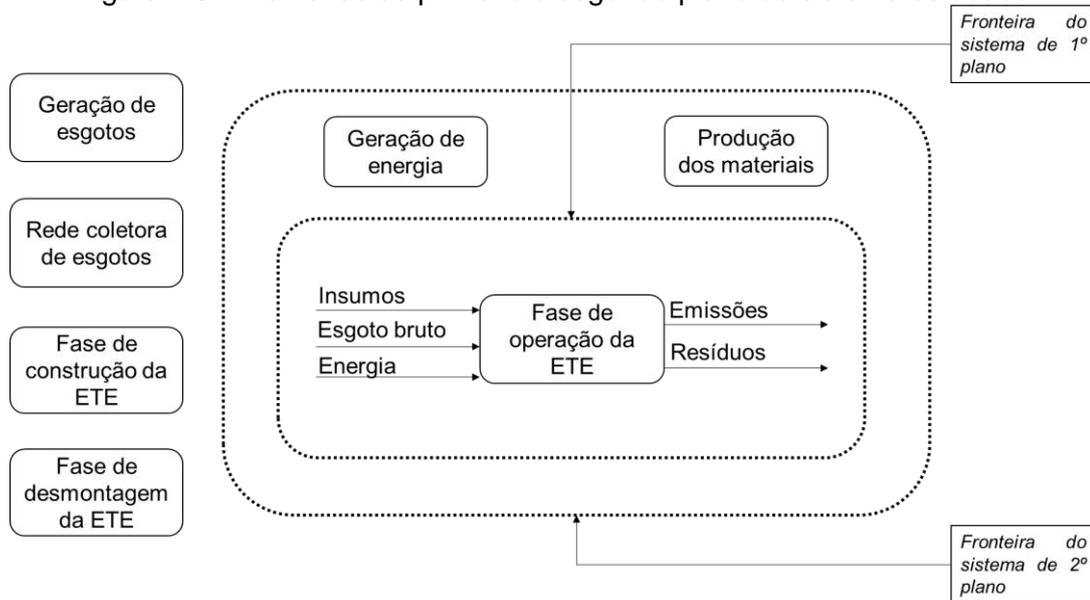
4.4.1.5 Delimitação da fronteira do sistema

Em todos os cenários, a fronteira do sistema foi delimitada pela chegada do esgoto bruto à ETE, até o ponto de lançamento final do efluente tratado no corpo receptor, ou seja, englobou o tratamento preliminar, a EEE, os reatores anaeróbios, o FAS/FAN, o DS, o filtro de areia e o tanque para desinfecção.

Foram ainda delimitadas a fronteira de primeiro plano do sistema, que inclui o quantitativo do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) das entradas e saídas da ETE e a fronteira de segundo plano, a qual engloba, além da fronteira de primeiro plano, os processos envolvidos na produção de energia e dos insumos utilizados, cujos dados foram obtidos por meio do banco de dados do Ecoinvent[®] (WERNET *et al.*, 2016), versão 3.3 (MORENO-RUIZ *et al.*, 2016). Não foram consideradas as etapas de geração, coleta e disposição final dos esgotos no corpo receptor, nem os eventos de manutenção dos equipamentos da ETE.

Não foram consideradas no estudo as fases de construção e descomissionamento da ETE, visto que não foi possível obter dados acerca dessas etapas. Além disso, uma vez que se trata de um estudo comparativo entre distintos cenários operacionais da mesma ETE, os impactos ambientais dessas etapas são iguais para todos os cenários. A Figura 4.6 apresenta as delimitações das fronteiras do sistema.

Figura 4.6 - Fronteiras de primeiro e segundo plano do sistema estudado



Fonte: Próprio autor.

4.4.1.6 Metodologias de avaliação de impacto de ciclo de vida e categorias de impacto selecionadas

Para a realização da ACV, utilizou-se o software SimaPro® 8.4 (GOEDKOOOP *et al.*, 2016), um dos mais utilizados mundialmente nos estudos de ACV aplicados ao tratamento de esgotos (GALLEGO *et al.*, 2008; LOPES *et al.*, 2017) e que inclui uma vasta gama de banco de dados e métodos de avaliação dos impactos do ciclo de vida. Como método de avaliação dos impactos de ciclo de vida (AICV) foram utilizados o CML-IA baseline v3.03 (GUINÉE *et al.*, 2002), para as categorias de impacto *midpoint* aquecimento global, eutrofização, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce e ecotoxicidade marinha e o *Cumulative Energy Demand* (Demanda acumulada de energia) (CED) (JUNGBLUTH e FRISCHKNECHT, 2010) versão 1.09.

A escolha da modelagem orientada para o problema (*midpoint*), em vez da modelagem orientada para o dano (*endpoint*) foi baseada nas recomendações de USEPA (2006), que indica que a modelagem *midpoint* é menos complexa, uma vez que essa abordagem diminui a quantidade de suposições, e facilita a comunicação dos resultados. Já a escolha das categorias de impacto foi baseada na relação entre as mesmas e as atividades da ETE, e nos estudos de Corominas *et al.* (2013) e Lopes *et al.* (2017), os quais apontaram que essas categorias de impacto são as principais avaliadas nos estudos de ACV de ETE. Já o método CED foi utilizado para calcular

toda a energia, direta e indireta, utilizada durante o ciclo de vida de cada cenário operacional.

4.4.1.7 Tipo e fonte dos dados

No cálculo das entradas e saídas da fase de operação da ETE, foram utilizados os valores das médias aritméticas das concentrações dos parâmetros físico-químicos avaliados no lodo e efluente final, dados das potências de funcionamento dos equipamentos, obtidos com os respectivos fabricantes, dados obtidos por meio de modelos matemáticos, e dados reportados na literatura. Os ICV foram compilados seguindo os princípios da série de normas ISO 14.040.

4.4.2 Metodologia para o cálculo das entradas e saídas dos inventários de ciclo de vida

Em relação ao regime hidráulico da estação, o sistema foi considerado permanente e conservativo, ou seja, não há variação da velocidade e da pressão do fluido, em um determinado ponto e não há perdas de efluente ao longo das etapas de tratamento.

Para calcular as entradas e as saídas da fase operacional da ETE, inicialmente calculou-se, a partir dos dados de vazão obtidos, a média dos valores de vazão registrados e o volume total de esgoto tratado, ao longo de 20 anos, cujos resultados estão expressos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Volume total de esgoto tratado, durante 20 anos

		Fonte
Número de dados	55.538	
Média dos valores de vazão afluente	19,2 m ³ /d	(1)
Vida útil considerada	20 anos	(2)
Volume total de esgoto tratado	140.160 m ³	

(1) Calculada a partir dos dados registrados no medidor de vazão;

(2) Estimada.

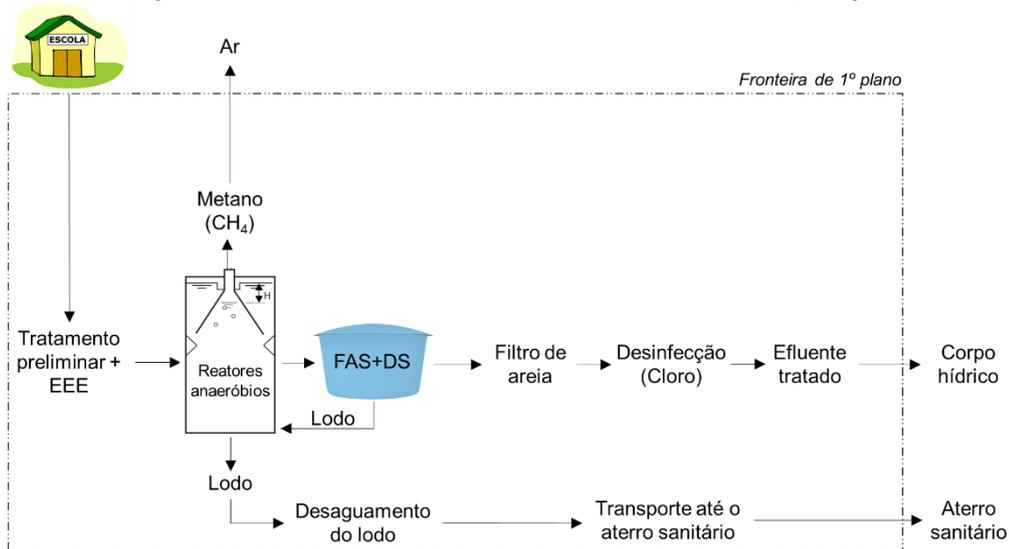
Fonte: Próprio autor.

4.4.2.1 Cálculo das entradas e saídas do Cenário 1

Nesse cenário, as entradas consideradas foram o esgoto bruto, o hipoclorito de sódio utilizado na desinfecção do efluente final, a energia consumida pelo conjunto elevatório da ETE, pelo sistema de aeração forçada do FAS e pela bomba de pressurização e o transporte do lodo produzido para disposição final. Já as saídas,

foram consideradas as emissões para a água, provenientes do efluente final tratado, as emissões para o ar, oriundas do metano produzido nos reatores anaeróbios e o lodo gerado nos reatores. A Figura 4.7 apresenta a fronteira do sistema desse cenário.

Figura 4.7 - Fronteira do sistema do cenário 1 de operação



Fonte: Próprio autor.

Para o cálculo do quantitativo da solução de hipoclorito de sódio, utilizada na desinfecção do efluente final tratado, foi adotada a concentração de cloro ativo de 15%, visto que o banco de dados do Ecoinvent[®] fornece o ciclo de vida dessa solução nessa concentração. Em seguida, a vazão de dosagem da solução foi obtida por meio da Equação 4.1. Devido à ausência de informações acerca da dosagem real de cloro no efluente final da ETE, foi adotada uma dosagem de 10 mg/L.

$$\text{Vazão de dosagem} \left(\frac{L}{\text{dia}} \right) = \frac{Q_{\text{afluente}} \left(\frac{L}{\text{dia}} \right) \times \text{Dosagem}_{\text{cloro}} \left(\frac{mg}{L} \right)}{\text{Concentração de cloro ativo} \left(\frac{mg}{L} \right)} \quad (4.1)$$

Portanto, ao se multiplicar a vazão de dosagem pela densidade da solução de hipoclorito de sódio e pelo período de vida útil da ETE, obteve-se o quantitativo total da solução de hipoclorito de sódio, ao longo do ciclo de vida, apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Quantidade da solução de hipoclorito de sódio a 15% utilizada na ETE

	Quantidade	Unidade	Fonte
Média dos valores de vazão afluente	19.200	L/dia	(1)
Concentração de cloro ativo	150	g/L	
Dosagem de cloro no efluente tratado	10	mg/L	(2)
Vazão de dosagem	1,3	L/dia	
Densidade da solução de hipoclorito de sódio a 15%	1.200	kg/m ³	(3)

	Quantidade	Unidade	Fonte
Quantitativo da solução de hipoclorito de sódio em 20 anos	11.212,8	kg	
Correlação com a unidade funcional	0,08	kg/m ³	

(1) Calculada, conforme Tabela 4.2;
(2) Estimada;
(3) Ficha de informações de segurança do hipoclorito de sódio, da Quimiclor. Disponível em: <http://www.hcrp.fmrp.usp.br/sitehc/fispq/Hipoclorito%20de%20S%F3dio.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2018.
Fonte: Próprio autor.

Em relação ao consumo de energia elétrica da ETE, foram obtidas as potências de cada equipamento com os respectivos fabricantes e, a partir dos respectivos tempos de funcionamento, calculou-se a energia consumida por dia e ao longo da vida útil da ETE. Não foram considerados os consumos da bomba dosadora de cloro e da bomba de recirculação do lodo, em função da contribuição desprezível no consumo total de energia da ETE. É importante destacar que o tempo de funcionamento diário adotado em alguns equipamentos foi de 14 horas, devido ao perfil de produção de esgotos observado na instituição de ensino, que é das 7 às 21 horas. A Tabela 4.4 apresenta os resultados.

Tabela 4.4 - Consumo energético dos equipamentos elétricos da ETE

Equipamento	Parâmetro	Quantidade	Em 20 anos	Fonte
Bomba de recalque da EEE	Potência	820 W		(1)
	Tempo de funcionamento	2,9 h/dia	21.170,00 h	(2)
	Energia consumida	2,38 kWh/dia	17.359,40 kWh	
Bomba de pressurização	Potência	740 W		(3)
	Tempo de funcionamento	14 h/dia	102.200,00 h	(4)
	Energia consumida	10,36 kWh/dia	75.628,00 kWh	
Compressores de ar	Potência	2.200 W		(3)
	Tempo de funcionamento	14 h/dia	102.200,00 h	(4)
	Energia consumida	30,80 kWh/dia	224.840,00 kWh	
Energia total consumida			317.827,40 kWh	
Correlação com a unidade funcional			2,268 kWh/m ³	

(1) Adotada a potência de um equipamento de características similares, devido à ausência de informações;
(2) Média dos valores das horas de funcionamento, obtidos nos horímetros das bombas de recalque;
(3) Potência de funcionamento discriminada em cada equipamento;
(4) Tempo de funcionamento adotado de acordo com o perfil de produção de esgotos da instituição.
Fonte: Próprio autor.

Para o cálculo da quantidade de lodo a ser transportada para o aterro sanitário, calculou-se a biomassa total presente no compartimento de digestão dos reatores anaeróbios, por meio da multiplicação das médias das concentrações de sólidos totais voláteis das amostras de lodo, cujos valores estão descritos no Apêndice A, e do volume de cada zona amostrada dos reatores. Em função da ausência de informações, adotou-se como alturas dos pontos de amostragem em relação ao fundo

dos reatores, 0,0 m, 0,4 m e 0,8 m, para as alturas 1, 2 e 3, respectivamente. A Tabela 4.5 apresenta o cálculo da biomassa total presente nos compartimentos de digestão dos reatores anaeróbios 1 e 2.

Tabela 4.5 – Biomassa total presente nos compartimentos de digestão dos reatores anaeróbios 1 e 2

Altura do reator		Reator anaeróbio 1	Reator anaeróbio 2	Fonte
Altura 1	Média da concentração de STV	8,7 kg STV/m ³	41,1 kg STV/m ³	(1)
	Altura do ponto de amostragem	0,0 m	0,4 M	(2)
	Volume da zona amostrada	1,98 m ³	1,98 m ³	(3)
	Quantidade de biomassa	17,2 kg STV	81,5 kg STV	
Altura 2	Média da concentração de STV	10,5 kg STV/m ³	28,4 kg STV/m ³	(1)
	Altura do ponto de amostragem	0,4 m	0,8 M	(2)
	Volume da zona amostrada	2,10 m ³	2,10 m ³	(3)
	Quantidade de biomassa	22,0 kg STV	59,6 kg STV	
Altura 3	Média da concentração de STV	4,3 kg STV/m ³	6,6 kg STV/m ³	(1)
	Altura do ponto de amostragem	0,8 m	1,2 m	(2)
	Volume da zona amostrada	2,24 m ³	2,24 m ³	(3)
	Quantidade de biomassa	9,5 kg STV	14,9 kg STV	
Biomassa total no compartimento de digestão		48,73 kg STV	155,97 kg STV	

(1) Análises físico-químicas (Apêndice A)

(2) Estimada

(3) Original Ambiental (2014)

Fonte: Próprio autor.

Assim, dado que a idade do lodo dos reatores anaeróbios pode ser calculada por meio da Equação 4.2 e que, de acordo com informações do operador da ETE, o intervalo de retirada de lodo dos reatores anaeróbios é elevado, estimou-se a idade do lodo em 60 dias e, assim, calculou-se a massa de sólidos retirada do sistema. Além disso, antes do encaminhamento do lodo para o aterro, foi considerado o desaguamento do mesmo por meio de *bags*, de forma a atingir um teor de sólidos de 30%. A Tabela 4.6 apresenta os resultados.

$$Idade\ do\ lodo = \frac{massa\ de\ sólidos\ no\ sistema}{massa\ de\ sólidos\ retirada\ do\ sistema} \quad (4.2)$$

Tabela 4.6 – Quantidade total de lodo encaminhado para o aterro, em 20 anos

		Fonte
Idade do lodo	60 Dias	(1)
Massa de lodo retirada do sistema	3,4 kg/dia	
Quantitativo total de lodo retirado da ETE, em 20 anos	24.905 kg	
Massa de sólidos no lodo dos Reatores Anaeróbios (teor de sólidos: 4%)	996,2 kg	
Quantidade total de lodo encaminhado para o aterro em 20 anos, após a desidratação em uma bag (teor de sólidos: 30%)	3.320,7 kg	

	Fonte
Correlação com a unidade funcional	0,024 kg/m ³
Correlação do momento de transporte com a unidade funcional (distância até o aterro: 32 km)	0,758 kg.km/m ³

(1) Estimada.

Fonte: Próprio autor.

Em relação às emissões para a água, foram considerados os dados físico-químicos de caracterização do efluente tratado, como a DQO, SST, NTK, fósforo total e cloro residual. A carga de cada parâmetro foi calculada por meio da multiplicação dos respectivos valores das médias das concentrações, durante a fase operacional, cujos valores são descritos no Apêndice A, pela média das vazões afluentes de esgoto. Em relação à concentração de cloro residual, como esse parâmetro não foi medido, a concentração no efluente tratado foi estimada em 0,5 mg/L. Assim, obteve-se um quantitativo total de cada parâmetro, por meio da multiplicação da carga obtida pelo tempo de vida útil da ETE. Por fim, foram obtidas as correlações de todas as saídas do inventário com a unidade funcional adotada, por meio da divisão entre os respectivos quantitativos totais e o volume total de esgoto tratado, durante o período de vida útil considerado. A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.7 - Concentração, carga, quantitativo e correlação com a unidade funcional dos parâmetros físico-químicos do efluente final tratado

Parâmetro	Concentração no efluente tratado	Média dos valores de vazão afluente (m³/h)	Carga (kg/h)	Quantitativo total	Correlação com a unidade funcional	Fonte
DQO	137,37 mg O ₂ /L	0,8	0,1099	19.253,78 kg	0,137 kg/m ³	(1)
Sólidos em suspensão	50,59 mg SS/L	0,8	0,0405	7.090,69 kg	0,051 kg/m ³	(1)
NTK	120,89 mg N/L	0,8	0,0967	16.943,94 kg	0,121 kg/m ³	(1)
Fósforo Total	9,68 mg P/L	0,8	0,0077	1356,75 kg	0,010 kg/m ³	(1)
Cloro residual	0,50 mg/L	0,8	0,0004	70,08 kg	0,001 kg/m ³	(2)

(1) Análises físico-químicas (Apêndice A);

(2) Estimado.

Fonte: Próprio autor.

O cálculo da estimativa de produção de biogás nos reatores anaeróbios foi realizado com o auxílio do software ProBio 1.0 (POSSETTI *et al.*, 2015), o qual foi desenvolvido baseado no modelo matemático proposto por Lobato (2011), o qual considera, no balanço de massa de DQO em reatores anaeróbios do tipo UASB, todas as vias de conversão da matéria orgânica e as perdas de metano.

Assim, a produção real de metano, em m³/dia, pode ser estimada por meio da Equação 4.9, onde Q_{CH_4} é a produção teórica máxima de metano por grama de DQO removida, Q_{W-CH_4} são as perdas de metano na fase gasosa, no gás residual, Q_{O-CH_4} são as outras perdas de metano na fase gasosa e Q_{L-CH_4} são as perdas de metano dissolvido no efluente:

$$Q_{REAL-CH_4} = Q_{CH_4} - Q_{W-CH_4} - Q_{O-CH_4} - Q_{L-CH_4} \quad (4.9)$$

Já o potencial energético disponível no biogás é estimado pela Equação 4.10, onde $Q_{N-REAL-CH_4}$ é a produção normalizada de metano e E_{CH_4} o poder calorífico decorrente da combustão do metano.

$$PE_{REAL-CH_4} = Q_{N-REAL-CH_4} - E_{CH_4} \quad (4.10)$$

Portanto, por meio da inserção dos dados de entrada, chegou-se aos resultados de quantitativo de produção de biogás, listados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Quantidade de metano produzido pelos reatores anaeróbios 1 e 2 na ETE

	Fase 1	Unidade	Fonte
Vazão afluyente em cada reator	9,6	m ³ /dia	(1)
DQO afluyente	765	mg/L	(2)
Concentração de SO ₄ ²⁻ no afluyente	40	mg/L	(2)
Eficiência de remoção de DQO - Reator Anaeróbio 1	62	%	(3)
Eficiência de remoção de DQO - Reator Anaeróbio 2	66	%	(3)
Eficiência de redução do SO ₄ ²⁻	75	%	(4)
Coefficiente de produção de lodo	0,15	kg SV/kg DQO-removida	(4)
Coefficiente de produção de DQO-lodo	0,213	kg DQO-lodo/kg DQO-removida	(4)
Temperatura operacional do reator	25	°C	(4)
Fator de supersaturação de CH ₄ na fase líquida	1,35		(4)
Perda de CH ₄ na fase gasosa com o gás residual	5	%	(4)
Outras perdas de CH ₄ na fase gasosa	5	%	(4)
Densidade do metano a 25°C	0,655	kg/m ³	
Produção real de metano no biogás do reator anaeróbio 1	0,9	m ³ /dia	
Produção real de metano no biogás do reator anaeróbio 2	1,0	m ³ /dia	
Quantitativo total de metano do reator anaeróbio 1	4.302	kg CH ₄	
Quantitativo total de metano do reator anaeróbio 2	4.780	kg CH ₄	
CH ₄ produzido por m ³ de esgoto tratado, em 20 anos	0,065	kgCH ₄ /m ³	

(1) Calculada, conforme apresentado na Tabela 4.2;

(2) Análises físico-químicas (Apêndice A);

(3) Calculada com base nos resultados das análises físico-químicas;

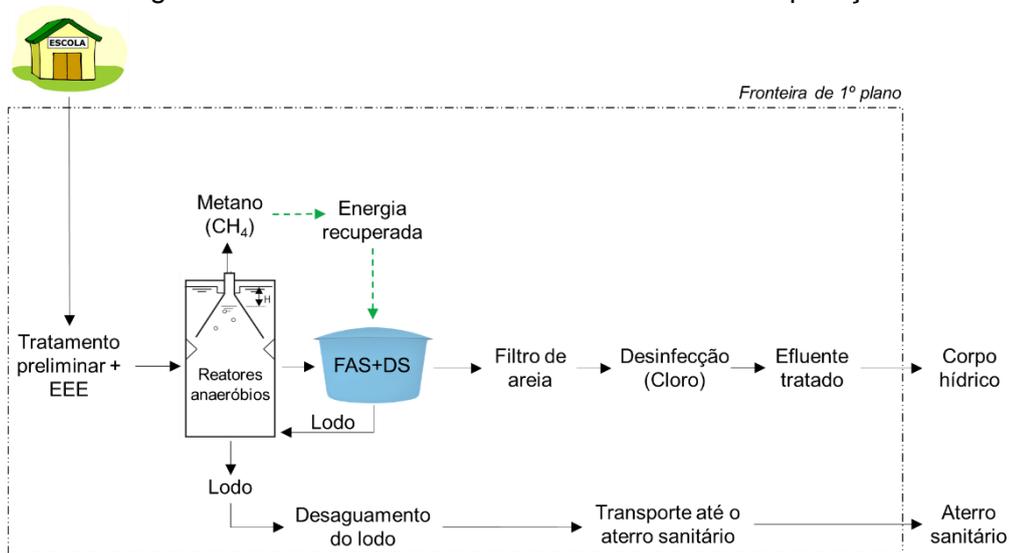
(4) Dados adotados para o cenário típico do software.

Fonte: Próprio autor.

4.4.2.2 Cálculo das entradas e saídas do Cenário 2

Uma vez que o consumo de energia elétrica da ETE no Cenário 1 é elevado, por conta do funcionamento do sistema de aeração forçada do FAS, principalmente, e que as emissões de metano decorrentes do tratamento podem contribuir significativamente no impacto da categoria aquecimento global, foi elaborado um cenário operacional hipotético, baseado no Cenário 1 e alinhado com a prática do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos, no qual todo o biogás gerado nos reatores anaeróbios seria aproveitado para a produção de energia, por meio de uma microturbina. A Figura 4.8 apresenta a fronteira do sistema desse cenário.

Figura 4.8 - Fronteira do sistema do cenário 2 de operação



Fonte: Próprio autor.

Para a construção desse cenário, foi necessário calcular o potencial energético disponível no biogás produzido nos reatores anaeróbios, onde se utilizou o software ProBio 1.0 (POSSETTI *et al.*, 2015), e a quantidade de eletricidade gerada por meio da microturbina. Também foi necessário recalcular a eletricidade consumida na ETE a partir da rede de distribuição, uma vez que parte da energia utilizada seria gerada a partir do aproveitamento do biogás. A Tabela 4.9 e a Tabela 4.10 apresentam os respectivos cálculos.

Tabela 4.9 – Cálculo da energia gerada por meio do aproveitamento da energia química disponível no biogás produzido pelos reatores anaeróbios 1 e 2

		Fonte
Potencial energético disponível - Reator anaeróbio 1	8,1 kWh/dia	(1)
Potencial energético disponível - Reator anaeróbio 2	8,8 kWh/dia	(1)
Potencial energético disponível total	16,9 kWh/dia	(1)
Rendimento elétrico da microturbina	28 %	(2)

	Fonte
Eletricidade gerada, em 20 anos	34.543,6 kWh
Correlação com a unidade funcional	0,246 kWh/m ³

(1) Calculado, por meio do software Probio 1.0 (POSSETTI *et al.*, 2015);

(2) Adotado, baseado em dados levantados por Pécora (2006).

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.10 - Consumo dos equipamentos elétricos da ETE no cenário 2, considerando a energia evitada

Equipamento	Parâmetro	Quantidade	Unidade	20 anos	Unidade	Fonte
Bomba de recalque da EEE	Potência	820	W			(1)
	Tempo de funcionamento	2,9	h/dia	21.170,00	h	(2)
	Energia consumida	2,38	kWh/dia	17.359,40	kWh	
Bomba de pressurização	Potência	740	W			(3)
	Tempo de funcionamento	14	h/dia	102.200,00	h	(4)
	Energia consumida	10,36	kWh/dia	75.628,00	kWh	
Compressores de ar	Potência	2.200	W			(3)
	Tempo de funcionamento	14	h/dia	102.200,00	h	(4)
	Energia consumida	30,80	kWh/dia	224.840,00	kWh	
Energia total consumida, em 20 anos				317.827,40	kWh	
Energia evitada, em 20 anos				34.543,60	kWh	
Correlação com a unidade funcional				2,021	kWh/m ³	

(1) Adotada a potência de um equipamento de características similares, devido à ausência de informações;

(2) Valor da média das horas de funcionamento, obtidos nos horímetros das bombas de recalque;

(3) Potência de funcionamento discriminada em cada equipamento;

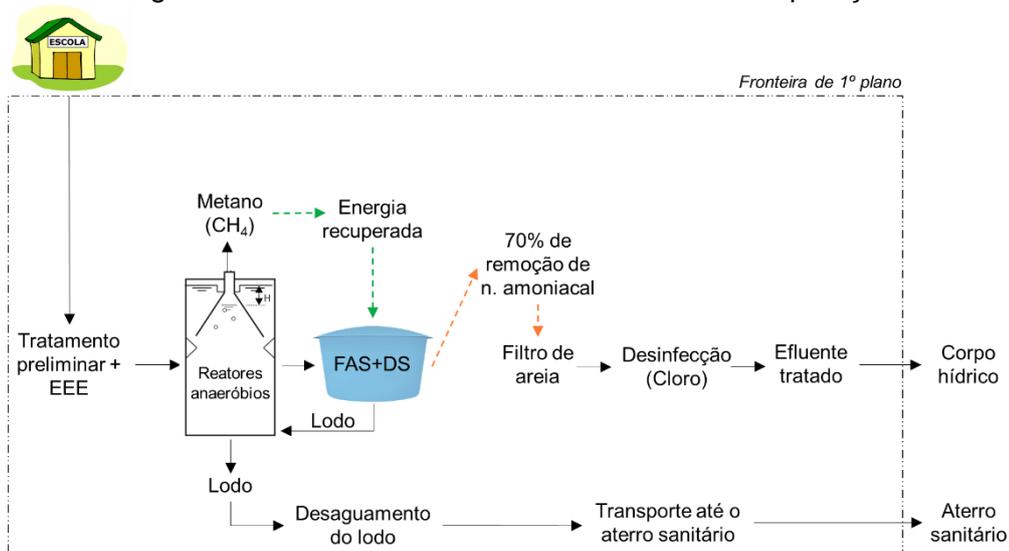
(4) Tempo de funcionamento adotado de acordo com o perfil de produção de esgotos da instituição.

Fonte: Próprio autor.

4.4.2.3 Cálculo das entradas e saídas do cenário 3

O cenário 3 consistiu de outro cenário operacional hipotético, baseado no cenário 2, no qual, além do aproveitamento energético do biogás produzido nos reatores anaeróbios, considerou-se que o FAS+DS removeria 70% do nitrogênio amoniacal do esgoto afluente e a ETE produziria um efluente final com características descritas na literatura técnica (JORDÃO E PESSOA, 2005; FLORÊNCIO *et al.*, 2009; ABNT, 2018, no prelo), para os processos de tratamento da ETE. A Figura 4.9 apresenta a fronteira do sistema desse cenário.

Figura 4.9 - Fronteira do sistema do cenário 3 de operação



Fonte: Próprio autor.

Para a construção desse cenário, foi necessário recalcular os quantitativos dos parâmetros físico-químicos do efluente tratado, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Concentração, carga, quantitativo e correlação com a unidade funcional dos parâmetros físico-químicos do efluente final tratado, para o cenário 3

Parâmetro	Concentração no efluente tratado	Média dos valores de vazão afluente (m ³ /h)	Carga (kg/h)	Quantitativo total	Correlação com a unidade funcional	Fonte
DQO	80,0 mg O ₂ /L	0,8	0,064	11.212,80 kg	0,080 kg/m ³	(1)
SST	30,0 mg SST/L	0,8	0,024	4.204,80 kg	0,030 kg/m ³	(2)
N. amoniacal	33,7 mg N-NH ₃ /L	0,8	0,027	4.725,77 kg	0,034 kg/m ³	(3)
Fósforo total	10,0 mg P/L	0,8	0,008	1.401,60 kg	0,010 kg/m ³	(4)
Cloro residual	0,5 mg/L	0,8	0,0004	70,08 kg	0,0005 kg/m ³	(5)

(1) Calculado a partir do valor de DBO (20 mg O₂/L) recomendado para água de reúso pela ABNT (2018, no prelo) e do valor da média das relações DBO/DQO (4) no efluente tratado da ETE;

(2) Jordão e Pessoa (2005);

(3) Remoção de 70%, para carga orgânica aplicada de 0,5 a 1,0 kgDQO/m³.d, conforme Florencio *et al.* (2009);

(4) Análises físico-químicas (Apêndice A);

(5) Estimado;

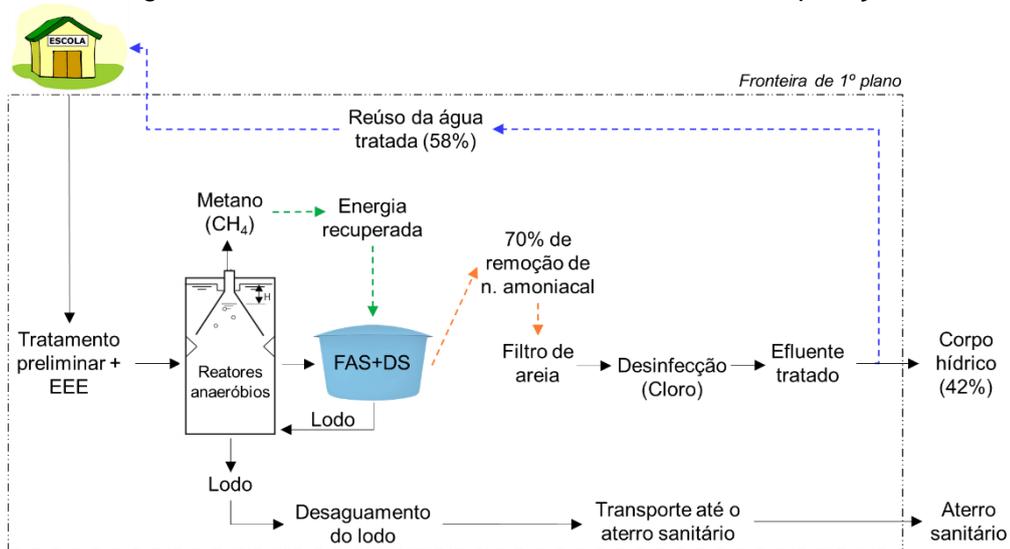
Fonte: Próprio autor.

4.4.2.4 Cálculo das entradas e saídas do Cenário 4

Para verificar se o emprego de outra tecnologia para o saneamento voltado para recursos, o reúso da água tratada, poderia melhorar ainda mais o desempenho ambiental da ETE, foi elaborado um cenário operacional hipotético, onde, além das melhorias empregadas nos Cenários 2 e 3, parte da água tratada seria reutilizada nas

descargas das bacias sanitárias da própria instituição. A Figura 4.10 apresenta a fronteira do sistema desse cenário.

Figura 4.10 - Fronteira do sistema do cenário 4 de operação



Fonte: Próprio autor.

Para a construção do ICV desse cenário, foram calculadas a previsão do consumo de água pelas bacias sanitárias, assim como também foram recalculadas as emissões para a água dos parâmetros físico-químicos, referentes aos padrões da água de reúso.

A escola não forneceu informações de consumo de água e da quantidade de banheiros e bacias sanitárias, portanto, o consumo de água de reúso no uso nas bacias sanitárias, ao longo da vida útil da ETE, foi estimado com base na população flutuante da instituição e no estudo de Barros *et al.* (2004), que verificou o perfil do uso da água em um conjunto de escolas municipais de Campinas – SP. O volume obtido foi considerado no ICV como um produto evitado, nesse caso, a água potável, usada nas descargas das bacias sanitárias da unidade de ensino.

Apesar de ser um fator relevante, não foi considerado o acréscimo do consumo de energia relativo ao recalque da água de reúso para um reservatório superior, devido à ausência de informações e detalhamento do projeto predial de instalações hidráulicas. A Tabela 4.12 apresenta os resultados dos cálculos da previsão do consumo de água nas bacias sanitárias e a Tabela 4.13 apresenta os cálculos do quantitativo total das substâncias emitidas para a água.

Tabela 4.12 – Previsão de consumo de água de reúso, nas bacias sanitárias

			Fonte
Quantidade de alunos	1.500	Pessoas	(1)
Quantidade de funcionários	82	Pessoas	(1)
Dias letivos	200	Dias	
Dias úteis	260	Dias	
Volume de água em cada descarga	6	L/por descarga	
Frequência média - alunos	2	acionamentos/dia	(2)
Frequência média - funcionários	4	acionamentos/dia	(2)
Volume anual - Alunos	3.600,0	m ³	
Volume anual - Funcionários	511,7	m ³	
Volume total em 20 anos	82.233,6	m ³	
Correlação com a unidade funcional	0,587	ton/m ³	

(1) Original Ambiental (2014);

(2) Barros *et al.* (2004);

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.13 - Concentração, carga, quantitativo e correlação com a unidade funcional dos parâmetros físico-químicos do efluente final tratado no cenário 4

Parâmetro	Concentração	Média dos valores de vazão afluente (m ³ /h)	Carga (kg/h)	Quantitativo total	Correlação com a unidade funcional	Fonte
DQO	80,00 mg O ₂ /L	0,8	0,026	4.634,11 kg	0,033 kg/m ³	(1)
Sólidos em suspensão	30,00 mg SST/L	0,8	0,010	1.737,79 kg	0,012 kg/m ³	(2)
N. Amoniacal	36,30 mg N/L	0,8	0,012	2.102,73 kg	0,015 kg/m ³	(3)
Fósforo Total	10,24 mg P/L	0,8	0,003	579,26 kg	0,004 kg/m ³	(4)
Cloro residual	0,5 mg/L	0,8	0,0002	28,96 kg	0,0002 kg/m ³	(5)

(1) Calculado a partir do valor de DBO (20 mg O₂/L) recomendado para água de reúso pela ABNT (2018, no prelo) e do valor da média das relações DBO/DQO (4) no efluente tratado da ETE;

(2) Jordão e Pessoa (2005);

(3) Remoção de 70%, para carga orgânica aplicada de 0,5 a 1,0 kgDQO/m³.d, conforme Florencio *et al.* (2009);

(4) Análises físico-químicas (Apêndice A);

(5) Estimado.

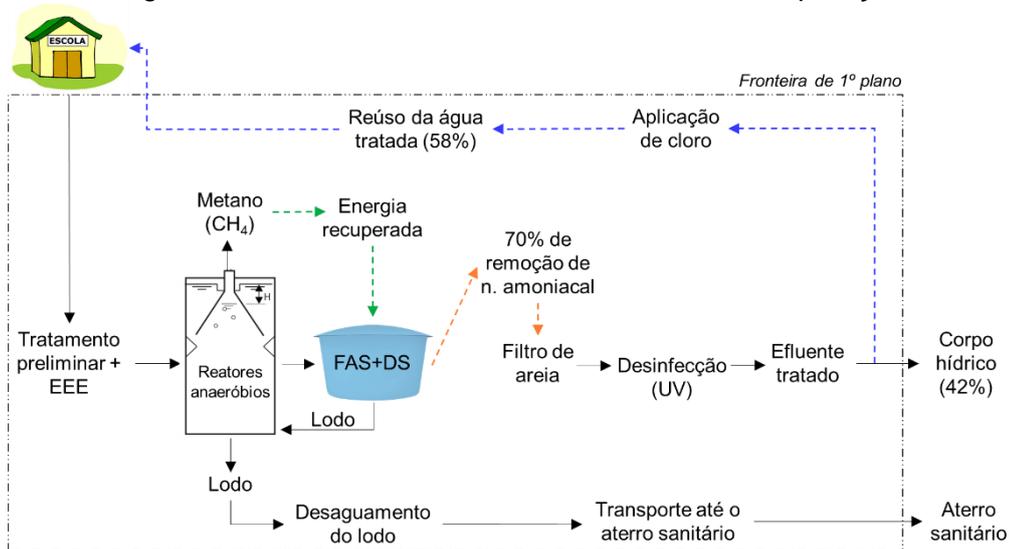
Fonte: Próprio autor.

4.4.2.5 Cálculo das entradas e saídas do Cenário 5

De forma a avaliar se o emprego de um método alternativo de desinfecção pode apresentar um melhor desempenho ambiental de ciclo de vida, elaborou-se um cenário operacional hipotético, com as mesmas características do Cenário 4, contudo a desinfecção do efluente final seria realizada por meio de lâmpadas UV. Esse método de desinfecção foi escolhido como uma tentativa de diminuir os possíveis impactos de ciclo de vida associados com o uso da solução de hipoclorito de sódio. Além disso, a desinfecção por lâmpadas UV também proporciona maior robustez na inativação de

organismos patogênicos presentes no efluente final. A Figura 4.11 apresenta a fronteira do sistema desse cenário.

Figura 4.11 - Fronteira do sistema do cenário 5 de operação



Fonte: Próprio autor.

Para a construção do respectivo ICV, foi calculado o acréscimo do consumo de energia, oriundo do sistema de desinfecção UV, cujo resultado está apresentado na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Consumo energético dos equipamentos elétricos da ETE, no cenário 5

Equipamento	Parâmetro	Quantidade	Unidade	Em 20 anos	Unidade	Fonte
Bomba de recalque da EEE	Potência	820	W			(1)
	Tempo de funcionamento	2,9	h/dia	21.170,00	h	(2)
	Energia consumida	2,38	kWh/dia	17.359,40	kWh	
Bomba de pressurização	Potência	740	W			(3)
	Tempo de funcionamento	14	h/dia	102.200,00	h	(4)
	Energia consumida	10,36	kWh/dia	75.628,00	kWh	
Compressores de ar	Potência	1.500	W			(3)
	Tempo de funcionamento	14	h/dia	102.200,00	h	(4)
	Energia consumida	21,00	kWh/dia	153.300,00	kWh	
Lâmpadas UV	Potência	1.400	W			(5)
	Tempo de funcionamento	14	h/dia	102.200,00	h	(4)
	Energia consumida	19,60	kWh/dia	143.080,00	kWh	
Energia total consumida				389.367,40	kWh	
Energia evitada				34.543,60	kWh	
Correlação com a unidade funcional				2,532	kWh/m ³	

(1) Adotada a potência de um equipamento de características similares, devido à ausência de informações;

(2) Média dos valores das horas de funcionamento, obtidos nos horímetros das bombas de recalque;

(3) Potência de funcionamento discriminada no equipamento;

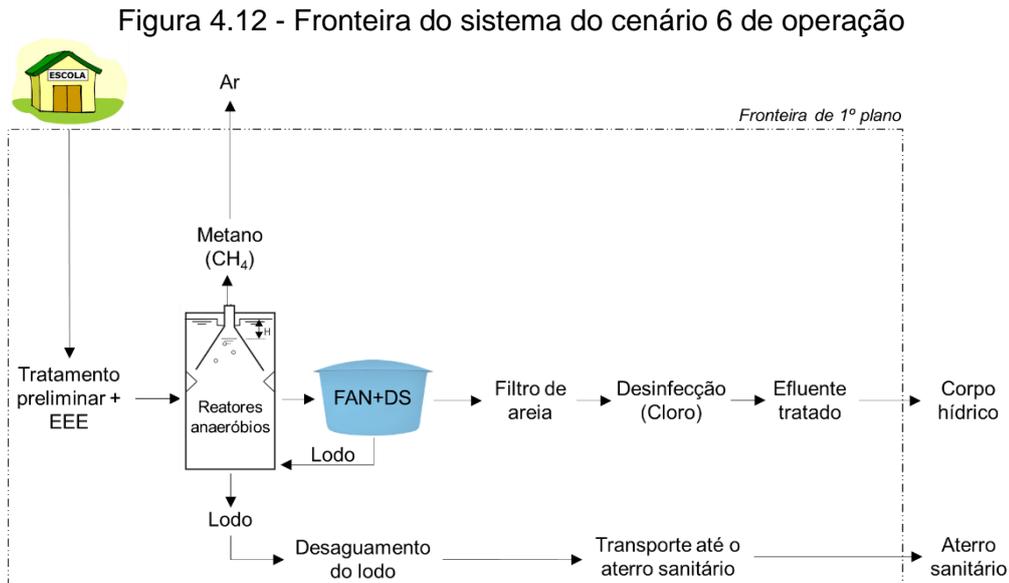
(4) Tempo de funcionamento adotado de acordo com o perfil de produção de esgotos da instituição;

(5) Ficha técnica do sistema de Desinfecção UV Trojan PTP, Modelo 3400K-1;

Fonte: Próprio autor.

4.4.2.6 Cálculo das entradas e saídas do Cenário 6

Para se avaliar o desempenho ambiental de ciclo de vida da fase 2 de monitoramento, no qual a ETE operou por meio de uma combinação de dois processos anaeróbios de tratamento distintos, foi necessário calcular o quantitativo de todas as entradas e saídas, de forma a compilar o ICV. A Figura 4.12 apresenta a respectiva fronteira do sistema.



Fonte: Próprio autor.

Para a construção desse cenário, foi necessário calcular a quantidade da solução de hipoclorito de sódio aplicada no efluente final, durante o ciclo de vida da ETE. Para isso, foram considerados os resultados de Silva (2018), que obteve a dosagem requerida de aplicação desse agente desinfetante, ao realizar um estudo na mesma ETE sobre a demanda de cloro necessária à redução da concentração de bactérias do grupo Coliformes e *Escherichia coli* no efluente final. A Tabela 4.15 apresenta os resultados.

Tabela 4.15 - Quantidade da solução de hipoclorito de sódio a 15% utilizada na ETE, no cenário 6

	Quantidade	Unidade	Fonte
Volume de esgoto afluente médio	19.200	L/dia	(1)
Concentração de cloro ativo	150	g/L	
Concentração de cloro no efluente tratado	30	mg/L	(2)
Vazão de dosagem	3,84	L/dia	
Densidade da solução de hipoclorito de sódio a 15%	1.200	kg/m ³	(3)
Dosagem diária de hipoclorito de sódio	4,6	kg/dia	
Quantitativo de hipoclorito de sódio em 20 anos	33.638,40	kg	
Correlação com a unidade funcional	0,24	kg/m ³	

(1) Calculada, conforme Tabela 4.2;

(2) Silva (2018);

(3) Ficha de informações de segurança do hipoclorito de sódio, da Quimiclor. Disponível em: <http://www.hcrp.fmrp.usp.br/sitehc/fispq/Hipoclorito%20de%20S%F3dio.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2018.

Fonte: Próprio autor.

Foi recalculada também a correlação da energia consumida na ETE com a unidade funcional, levando em consideração que o sistema de aeração do FAS permaneceu desligado nessa etapa. A Tabela 4.16 apresenta os cálculos.

Tabela 4.16 - Consumo energético dos equipamentos elétricos da ETE, na fase 2

Equipamento	Parâmetro	Quantidade	Unidade	Em 20 anos	Unidade	Fonte
Bomba de recalque da EEE	Potência	820	W			(1)
	Tempo de funcionamento	2,9	h/dia	21.170,00	h	(2)
	Energia consumida	2,38	kWh/dia	17.359,40	kWh	
Bomba de pressurização	Potência	740	W			(3)
	Tempo de funcionamento	14	h/dia	102.200,00	h	(4)
	Energia consumida	8,88	kWh/dia	75.628,00	kWh	
Energia total consumida, em 20 anos				92.987,40	kWh	
Correlação com a unidade funcional				0,663	kWh/m ³	

(1) Adotada a potência de um equipamento de características similares, devido à ausência de informações;

(2) Média dos valores das horas de funcionamento, obtidos nos horímetros das bombas de recalque;

(3) Potência de funcionamento discriminada no equipamento;

(4) Tempo de funcionamento adotado de acordo com o perfil de produção de esgotos da instituição.

Fonte: Próprio autor.

Visto que o intervalo entre os eventos de descarte de lodo dos reatores anaeróbios da ETE é elevado, considerou-se a mesma quantidade de lodo retirada e transportada para o aterro sanitário utilizada no Cenário 1. Já a quantidade de metano produzida na fase 2 foi maior, em virtude do aumento da DQO afluente e das eficiências de remoção de DQO nos dois reatores anaeróbios. A Tabela 4.17 apresenta os resultados.

Tabela 4.17 - Quantidade de metano produzido pelos reatores anaeróbios 1 e 2 na ETE, na fase 2

	Fase 2	Unidade	Fonte
Vazão afluente em cada reator	9,6	m ³ /dia	(1)
DQO afluente	1.000*	mg/L	(1)
Concentração de SO ₄ no afluente	37	mg/L	(1)
Eficiência de remoção de DQO - Reator Anaeróbio 1	71	%	(1)
Eficiência de remoção de DQO - Reator Anaeróbio 2	72		(1)
Eficiência de redução do SO ₄	75	%	(2)
Coeficiente de produção de lodo	0,15	kg SV / kg DQO-removida	(2)
Coeficiente de produção de DQO-lodo	0,213	kg DQO-lodo / kgDQO-removida	(2)
Temperatura operacional do reator	25	°C	(2)
Fator de supersaturação de CH ₄ na fase líquida (Fs)	1,35		(2)

	Fase 2	Unidade	Fonte
Perda de CH ₄ na fase gasosa com o gás residual	5	%	(2)
Outras perdas de CH ₄ na fase gasosa	5	%	(2)
Densidade do metano a 25°C	0,655	kg/m ³	
Produção real de metano no biogás do reator anaeróbio 1	1,5	m ³ /dia	
Produção real de metano no biogás do reator anaeróbio 2	1,5	m ³ /dia	
Quantitativo total de metano do reator anaeróbio 1	7.170	kg CH ₄	
Quantitativo total de metano do reator anaeróbio 2	7.170	kg CH ₄	
CH ₄ produzido por m ³ de esgoto tratado, em 20 anos	0,102	kg CH ₄ /m ³	

(*) Adotada igual a 1000 mg/L, pois o software não aceita o valor de 1024 mg/L;

(1) Dados medidos;

(2) Dados adotados para o cenário típico do software.

Fonte: Próprio autor.

Foi necessário também recalcular o quantitativo total dos parâmetros físico-químicos emitidos para a água, com base nos resultados das análises das amostras coletadas durante a fase 2 de monitoramento, cujos resultados estão descritos no Apêndice A. Para o cálculo da quantidade total de cloro residual emitida para a água, considerou-se o resultado do estudo de Silva (2018). A Tabela 4.18 apresenta os resultados.

Tabela 4.18 - Concentração, carga, quantitativo e correlação com a unidade funcional dos parâmetros físico-químicos do efluente final tratado, na fase 2

Parâmetro	Concentração	Média dos valores de vazão afluente (m ³ /h)	Carga (kg/h)	Quantitativo total	Correlação com a unidade funcional	Fonte
DQO	208,14 mg O ₂ /L	0,8	0,1665	29.172,90 kg	0,208 kg/m ³	(1)
Sólidos em suspensão	35,05 mg SST/L	0,8	0,0280	4.912,61 kg	0,035 kg/m ³	(1)
NTK	125,74 mg N/L	0,8	0,1006	17.623,72 kg	0,126 kg/m ³	(1)
Fósforo Total	10,74 mg P/L	0,8	0,0086	1.505,32 kg	0,011 kg/m ³	(1)
Cloro residual	9,20 mg/L	0,8	0,0074	1.289,47 kg	0,009 kg/m ³	(2)

(1) Análises físico-químicas (Apêndice A);

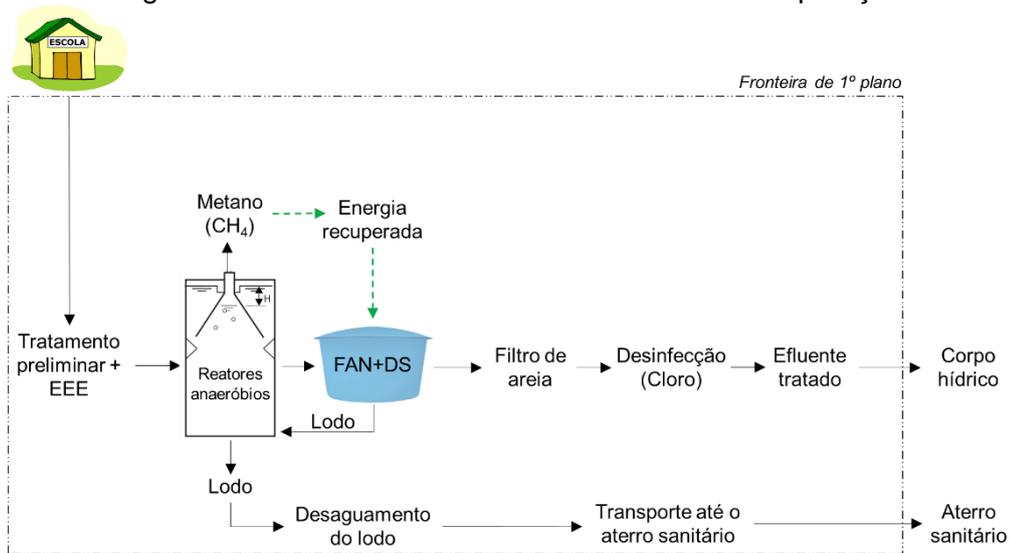
(2) Silva (2018).

Fonte: Próprio autor.

4.4.2.7 Cálculo das entradas e saídas do Cenário 7

Tendo em vista que as emissões de metano decorrentes do tratamento podem contribuir significativamente no impacto da categoria aquecimento global, foi elaborado um cenário operacional hipotético, alinhado com a prática do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos, baseado no Cenário 6, onde o metano gerado nos reatores anaeróbios seria aproveitado para a produção de energia, por meio de uma microturbina, a ser utilizada no consumo da própria ETE. A Figura 4.13 apresenta a fronteira do sistema desse cenário.

Figura 4.13 - Fronteira do sistema do cenário 7 de operação



Fonte: Próprio autor.

Para a construção desse cenário, foi necessário calcular o potencial energético disponível no biogás produzido nos reatores anaeróbios, durante a fase 2 de monitoramento, onde se utilizou o software ProBio 1.0 (POSSETTI *et al.*, 2015), e a eletricidade gerada por meio da microturbina. Também foi necessário recalculer a eletricidade consumida na ETE a partir da rede de distribuição, uma vez que parte da energia foi gerada a partir do aproveitamento do biogás. A Tabela 4.19 e a Tabela 4.20 apresentam os respectivos cálculos.

Tabela 4.19 - Cálculo da energia gerada por meio do aproveitamento da energia química disponível no biogás produzido pelos reatores anaeróbios 1 e 2, referente à fase 2 de monitoramento

		Fonte
Energia química disponível - Reator anaeróbio 1	13,7 kWh/dia	(1)
Energia química disponível - Reator anaeróbio 2	13,9 kWh/dia	(1)
Energia química disponível total	27,6 kWh/dia	(1)
Rendimento elétrico da microturbina	28 %	(2)
Eletricidade gerada, em 20 anos	56.414,4 kWh	
Correlação com a unidade funcional	0,403 kWh/m ³	

(1) Calculado, por meio do software Probio 1.0 (POSSETTI *et al.*, 2015);

(2) Adotado, baseado em dados levantados por Pécora (2006);

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.20 - Consumo elétrico dos equipamentos elétricos da ETE no cenário 7, considerando a energia evitada

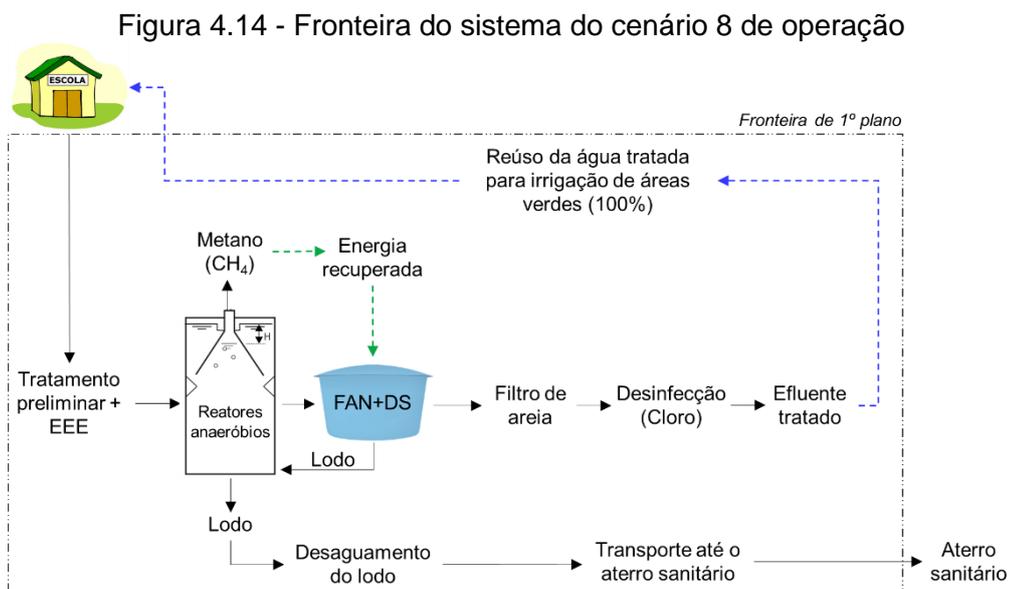
Equipamento	Parâmetro	Quantidade	Unidade	Em 20 anos	Unidade	Fonte
Bomba de recalque da EEE	Potência	820	W			(1)
	Tempo de funcionamento	2,9	h/dia	21.170,00	h	(2)
	Energia consumida	2,38	kWh/dia	17.359,40	kWh	
Bomba de pressurização	Potência	740	W			(3)
	Tempo de funcionamento	14	h/dia	102.200,00	h	(4)

Equipamento	Parâmetro	Quantidade	Unidade	Em 20 anos	Unidade	Fonte
	Energia consumida	10,36	kWh/dia	75.628,00	kWh	
Energia total consumida, em 20 anos				92.987,40	kWh	
Energia evitada, em 20 anos				56.414,40	kWh	
Correlação com a unidade funcional				0,261	kWh/m ³	

- (1) Adotada a potência de um equipamento de características similares, devido à ausência de informações;
 (2) Média dos valores das horas de funcionamento, obtidos nos horímetros das bombas de recalque;
 (3) Potência de funcionamento discriminada em cada equipamento;
 (4) Tempo de funcionamento adotado de acordo com o perfil de produção de esgotos da instituição;
 Fonte: Próprio autor.

4.4.2.8 Cálculo das entradas e saídas do Cenário 8

De forma a se verificar o desempenho ambiental da ETE, considerando, além do aproveitamento do biogás para a geração de energia, o reúso de toda a água tratada na ETE na irrigação das áreas verdes da edificação, elaborou-se um cenário hipotético, baseado no Cenário 7, cuja fronteira do sistema é apresentada na Figura 4.14.



Fonte: Próprio autor.

A quantidade dos parâmetros emitidos no efluente final permaneceu a mesma dos cenários 6 e 7. Contudo, o efluente final seria disposto no solo.

4.4.3 Apresentação dos resultados

Os resultados da avaliação dos impactos de ciclo de vida serão apresentados em termos da caracterização e normalização dos impactos. Embora este último seja um elemento opcional na etapa de avaliação dos impactos de ciclo de vida, como descreve a norma ISO 14.040/2009, optou-se por também realizar a normalização dos resultados, uma vez que facilita a visualização e a comparação dos impactos em termos de magnitude.

No cálculo da normalização dos resultados, divide-se o valor do impacto de cada categoria pelo valor total anual dos impactos ocorridos no mundo, em cada categoria de impacto. Assim, se obtém um valor adimensional, por meio do qual é possível avaliar e comparar a magnitude dos impactos, em relação à unidade funcional adotada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

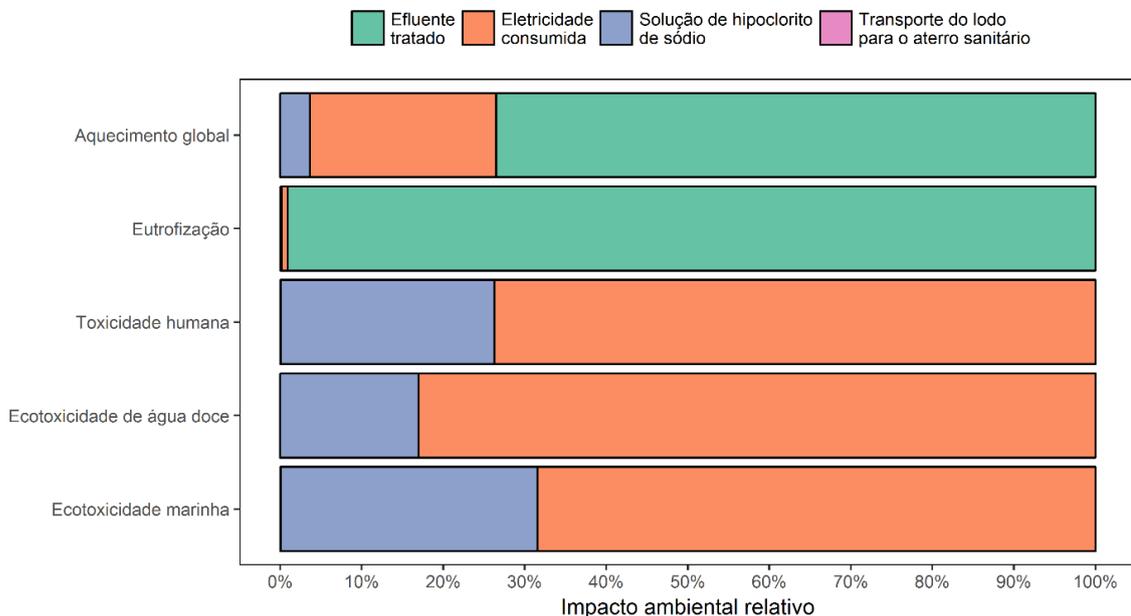
5.1 Resultados do monitoramento

Os resultados das análises físico-químicas das amostras do esgoto bruto, do efluente final e do lodo dos reatores anaeróbios, coletadas ao longo das fases 1 e 2 de monitoramento, são apresentados no Apêndice A.

5.2 Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 1

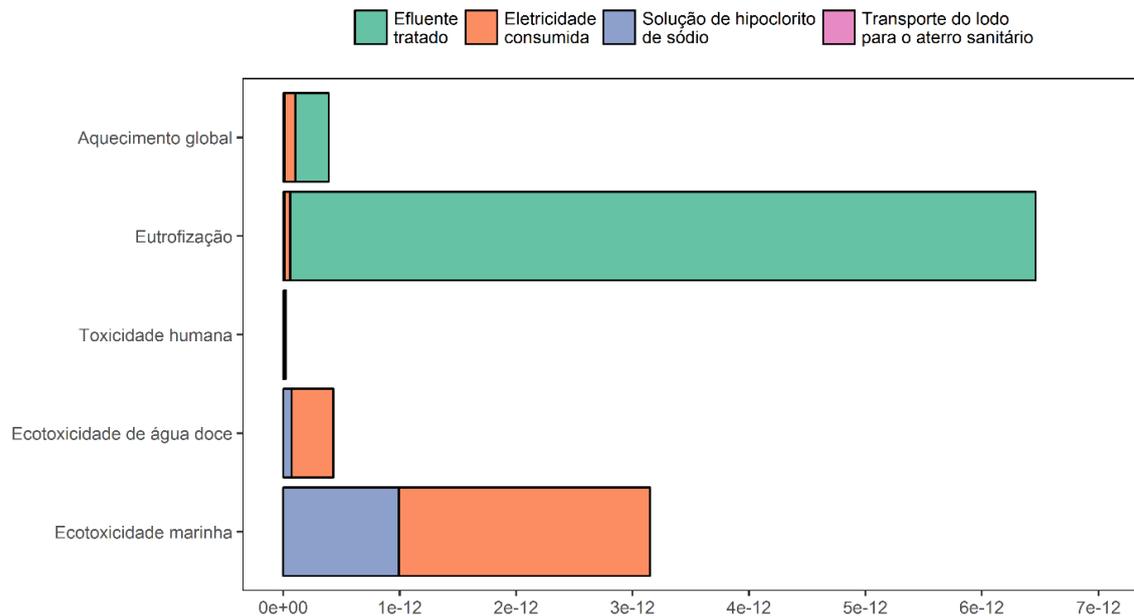
A Figura 5.1 e a Figura 5.2 apresentam, respectivamente, os resultados da caracterização e normalização da AICV do cenário 1, que corresponde à fase 1 de monitoramento da ETE. O respectivo ICV detalhado é apresentado no Apêndice B.

Figura 5.1 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 1 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.2 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 1 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Na categoria aquecimento global, o efluente tratado apresentou uma contribuição de 73% dos impactos de ciclo de vida em função das emissões atmosféricas de metano decorrentes do tratamento do efluente. O aproveitamento desse biogás para a geração de energia, que pode ser utilizada na própria ETE, pode diminuir essa contribuição. Em menor grau, também se observa, nessa categoria, a influência dos impactos do uso da solução de hipoclorito de sódio na desinfecção do efluente tratado, com contribuição aproximada de 4%, que está associada ao processo produtivo da solução do desinfetante, o qual emite grandes quantidades de CO₂ para o ar.

Ainda na categoria aquecimento global, o consumo de eletricidade na ETE representou 23% dos potenciais impactos. Grande parte é provocada pelo alto consumo de energia do sistema de aeração forçada do FAS, que representou 70% de toda a energia consumida ao longo do ciclo de vida da ETE. Vale destacar que o cálculo desses impactos leva em consideração a realidade da produção de energia de baixa tensão no Brasil, cujo ciclo produtivo é responsável por elevadas emissões de gases de efeito estufa, a exemplo do metano, dióxido de carbono e óxido nitroso. Contudo, ao se analisar os resultados normalizados, a magnitude dos impactos nessa categoria não foi significativa.

Na categoria eutrofização, quase a totalidade dos impactos (99%) ocorreu em função do descarte do efluente final tratado, cuja concentração de nutrientes é

consideravelmente elevada, uma vez que não há remoção satisfatória de nitrogênio no FAS+DS, e que não há nenhum processo adicional de remoção de fósforo. A fração restante dos impactos foi provocada pelas demais entradas e saídas consideradas. Vale ressaltar que as emissões de nitrogênio e fósforo total para a água responderam por cerca de 95% dos impactos do efluente final tratado, nessa categoria. Além disso, o resultado normalizado dos impactos apresentou magnitude muito superior às outras categorias.

Ao se avaliar as categorias relacionadas à toxicidade, foram mais representativos o consumo de eletricidade e o uso da solução de hipoclorito de sódio. Na toxicidade humana, o consumo de energia elétrica foi responsável por aproximadamente 74% dos impactos, seguido pelo uso da solução de hipoclorito de sódio (26%). Na categoria de ecotoxicidade de água doce, novamente a maior contribuição foi o uso da eletricidade (83%), seguida pelo uso da solução de hipoclorito de sódio (17%). Na categoria de ecotoxicidade marinha, o uso da eletricidade foi responsável por 68% dos impactos na categoria, seguido do uso da solução de hipoclorito de sódio (32%).

Verifica-se, portanto, que o consumo de energia elétrica na ETE contribuiu de forma significativa nas três categorias de toxicidade avaliadas. Tais resultados levam em consideração todos os impactos ocorridos durante o ciclo produtivo de 1 kWh de eletricidade de baixa tensão, onde são emitidas substâncias tóxicas para os distintos compartimentos ambientais, a exemplo de cádmio, cobre, níquel, zinco, dentre outras.

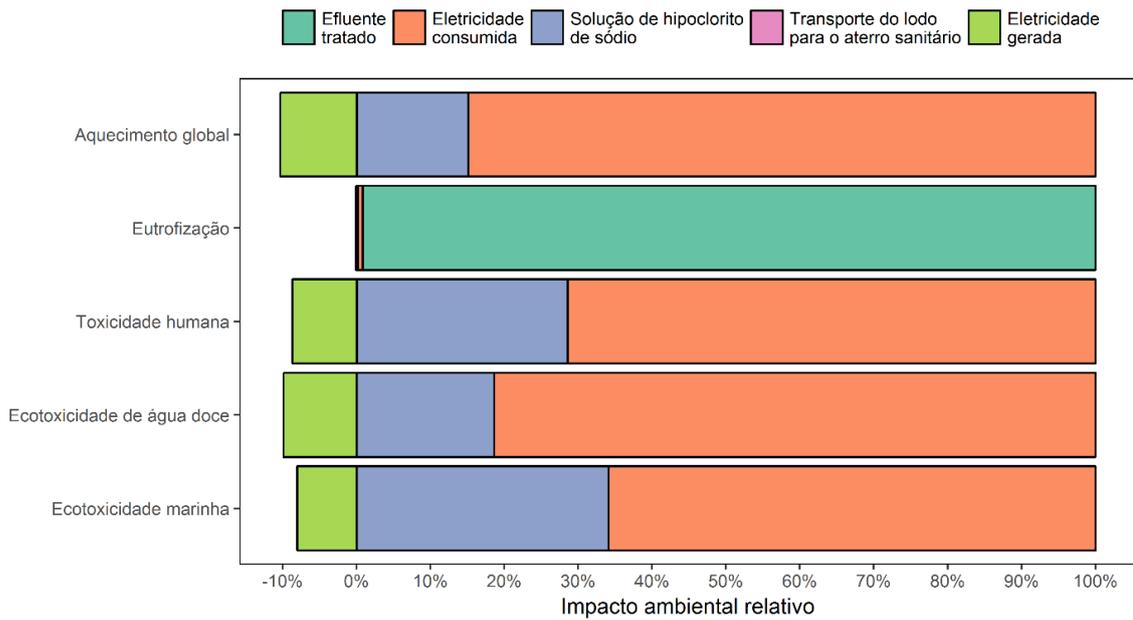
Ao se avaliar os resultados normalizados, verifica-se que a ecotoxicidade marinha foi a segunda categoria com maior impacto de ciclo de vida, representando aproximadamente metade do valor do impacto da categoria eutrofização. Os impactos totais ocorridos na categoria ecotoxicidade de água doce foram similares à categoria aquecimento global. Já o resultado da categoria toxicidade humana foi praticamente desprezível, dado que representou apenas 0,4% do impacto ocorrido na categoria eutrofização.

Em relação ao transporte do lodo para o aterro, visto que a produção de lodo na ETE é baixa, o impacto da gestão do mesmo não foi muito significativo em todas as categorias de impacto. Assim, alternativas de valorização do lodo não foram consideradas.

5.3 Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 2

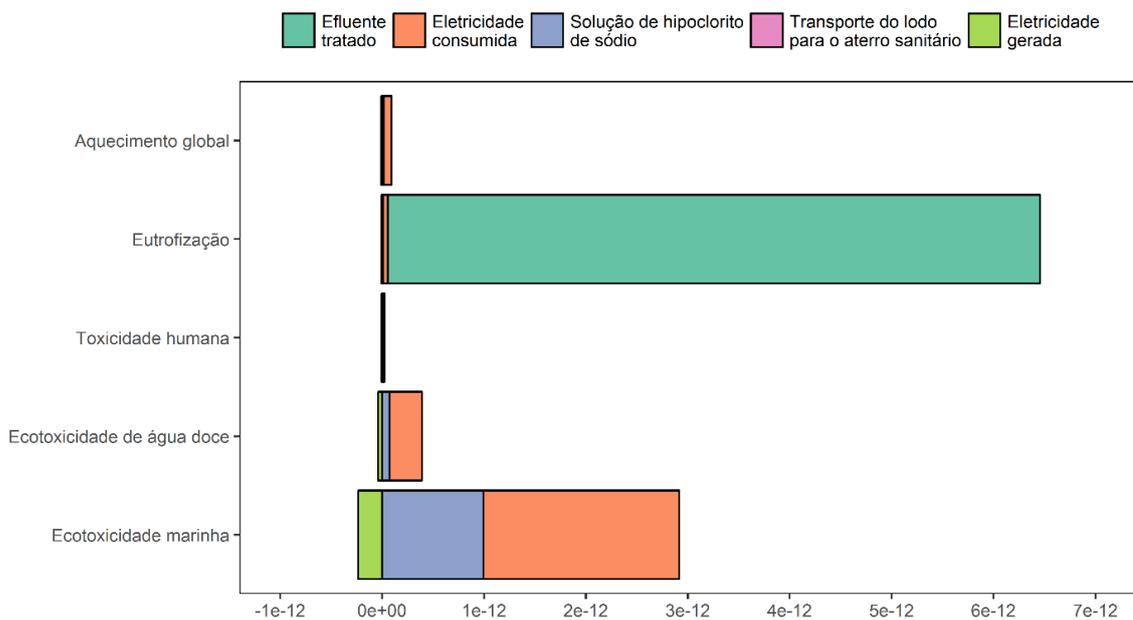
A Figura 5.3 e a Figura 5.4 apresentam, respectivamente, os resultados da caracterização e normalização da AICV do cenário 2. O respectivo ICV detalhado é apresentado no Apêndice C.

Figura 5.3 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 2 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.4 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 2 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

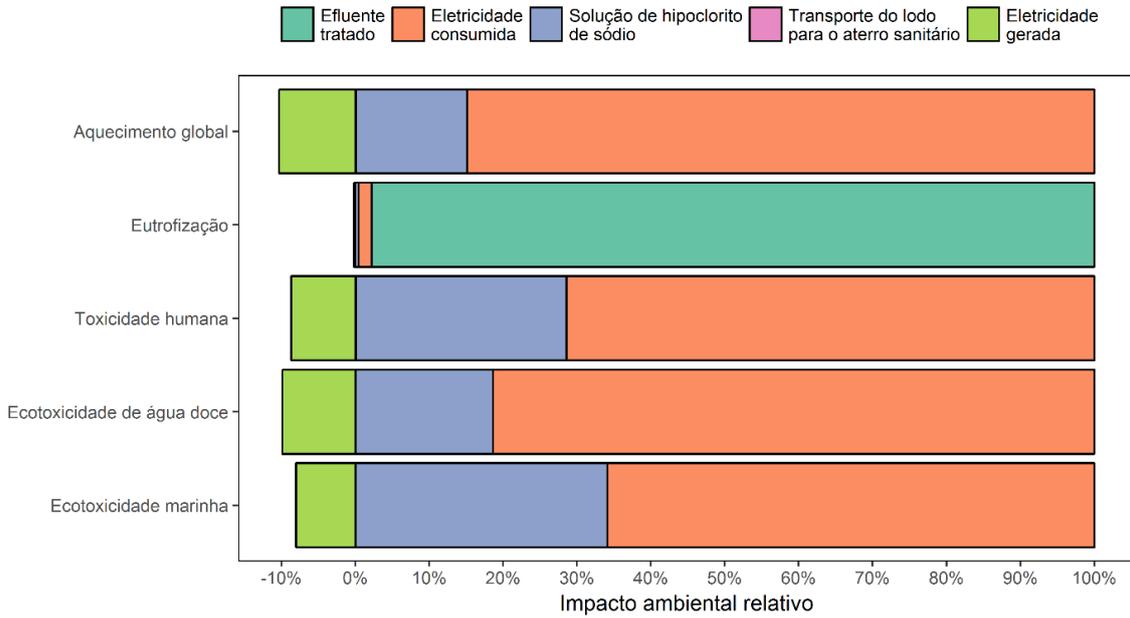
Na categoria aquecimento global, em comparação com o cenário 1, não se observa mais a contribuição do efluente tratado no impacto de ciclo de vida, visto que todo o biogás gerado nos reatores anaeróbios foi aproveitado para a geração de energia utilizada na própria ETE. Dessa forma, ocorreu uma redistribuição das contribuições, onde o consumo de eletricidade passou a representar 85% dos impactos e a energia gerada por meio do aproveitamento do biogás foi responsável por um impacto positivo de 10%, nessa categoria. Ao se analisar os resultados normalizados, o aproveitamento da energia do biogás, em comparação com o cenário 1, foi responsável por uma redução de 79% dos impactos de ciclo de vida nessa categoria.

Nas categorias relacionadas à toxicidade, o consumo evitado de energia elétrica oriunda das linhas de transmissão proporcionou impactos positivos de 8% nas categorias ecotoxicidade marinha, 10% na ecotoxicidade de água doce e 9% na toxicidade humana. Essa mudança foi responsável por uma redução dos impactos normalizados de 15% na ecotoxicidade marinha, de 18% na ecotoxicidade de água doce e de 16% na toxicidade humana, em comparação com o cenário 1. Já a redução dos impactos ocorrida na categoria eutrofização foi praticamente desprezível, tendo em vista que as emissões associadas ao uso da eletricidade apresentam pouca relevância nessa categoria.

5.4 Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 3

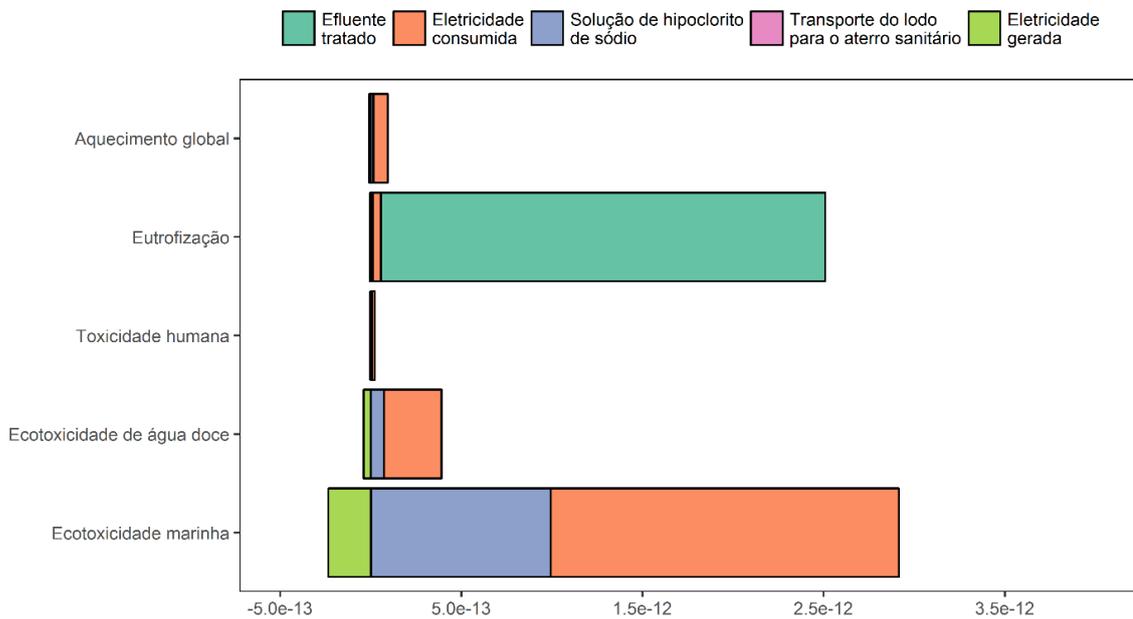
A Figura 5.5 e a Figura 5.6 apresentam, respectivamente, os resultados da caracterização e normalização da AICV do cenário 3. O respectivo ICV detalhado é apresentado no Apêndice D.

Figura 5.5 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 3 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.6 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 3 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

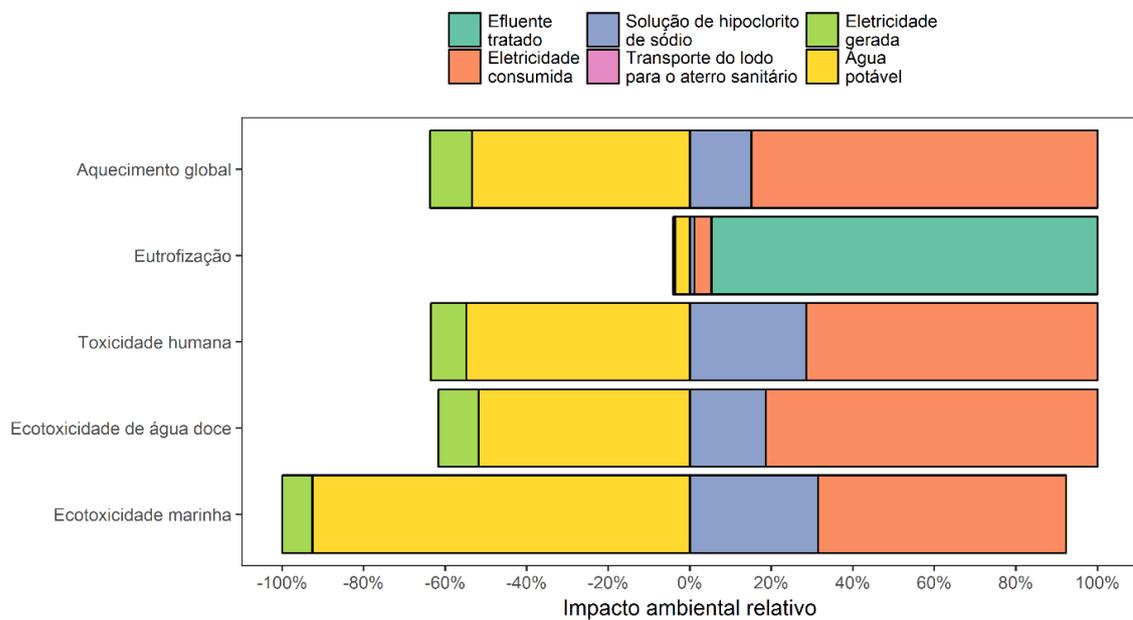
Conforme se observa nos resultados de caracterização, a produção de um efluente final na ETE com melhores características, em termos de matéria orgânica e nitrogênio, não alterou de forma significativa as contribuições dos impactos na categoria eutrofização. Contudo, essa mudança refletiu diretamente nos resultados normalizados, onde foi verificada uma diminuição de 61% dos impactos nessa

categoria, em relação aos cenários 1 e 2. Não foram observadas mudanças significativas nas outras categorias de impacto.

5.5 Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 4

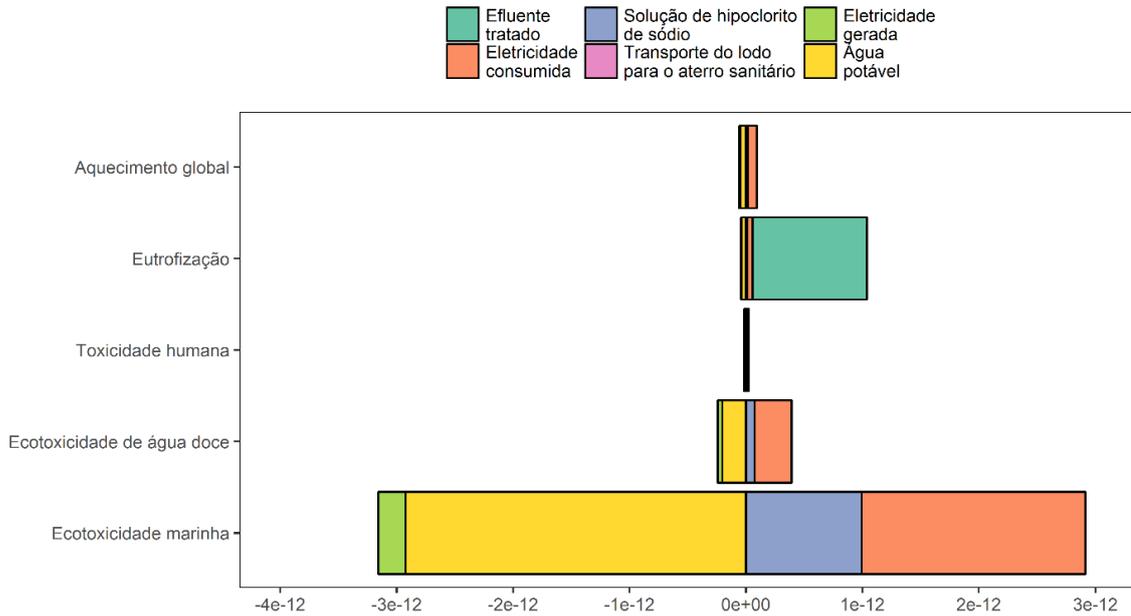
A Figura 5.7 e a Figura 5.8 apresentam, respectivamente, os resultados da caracterização e normalização da AICV do cenário 4. O respectivo ICV detalhado é apresentado no Apêndice E.

Figura 5.7 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 4 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.8 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 4 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Visto que o ciclo produtivo da água potável apresenta uma série de emissões de substâncias tóxicas, em comparação com os cenários operacionais anteriores, o cenário 4 apresentou impactos positivos em função do uso evitado da água potável, sobretudo nas categorias aquecimento global (53%), toxicidade humana (55%), ecotoxicidade de água doce (52%) e ecotoxicidade marinha (93%).

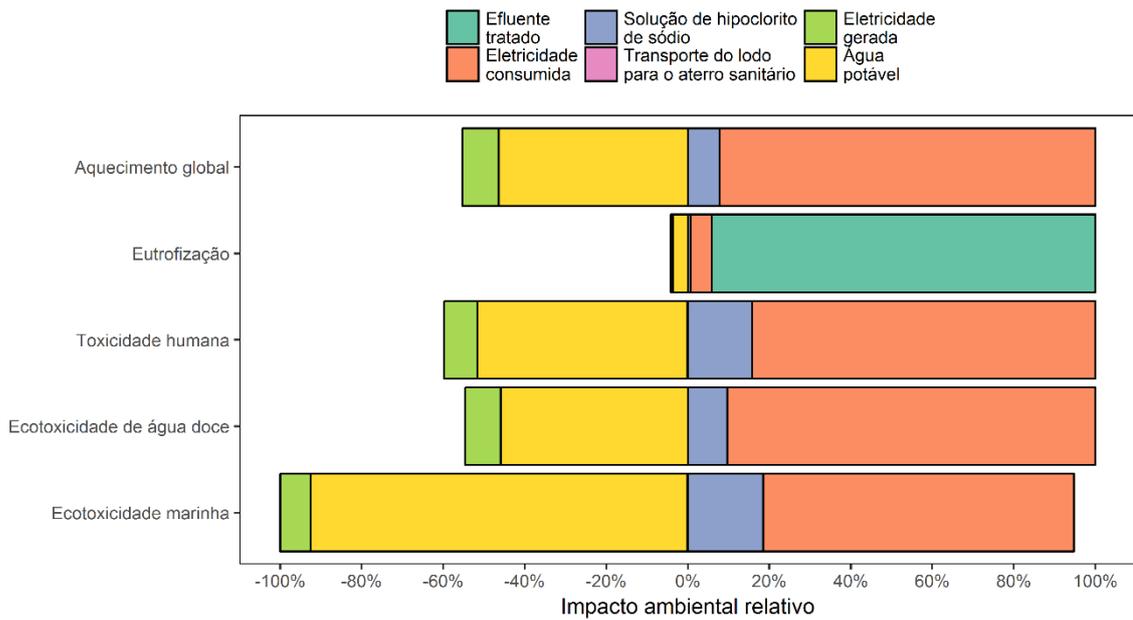
Comparado ao cenário 3, ao se analisar os resultados normalizados, houve uma redução nos impactos de 60% nas categorias aquecimento global e eutrofização, 90% na categoria toxicidade humana, 57% na categoria ecotoxicidade de água doce e de 109% na categoria ecotoxicidade marinha. Apesar de o cenário 4 ter proporcionado impactos positivos em todas as categorias, a categoria que apresentou maior potencial impacto de ciclo de vida continuou sendo a eutrofização, entretanto, com uma magnitude inferior.

Embora a contribuição da água potável, enquanto produto evitado, tenha sido pequena na categoria eutrofização, a redução acentuada observada nos impactos normalizados, em relação ao cenário 3, se deve à menor quantidade de nutrientes disposta diretamente no corpo hídrico.

5.6 Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 5

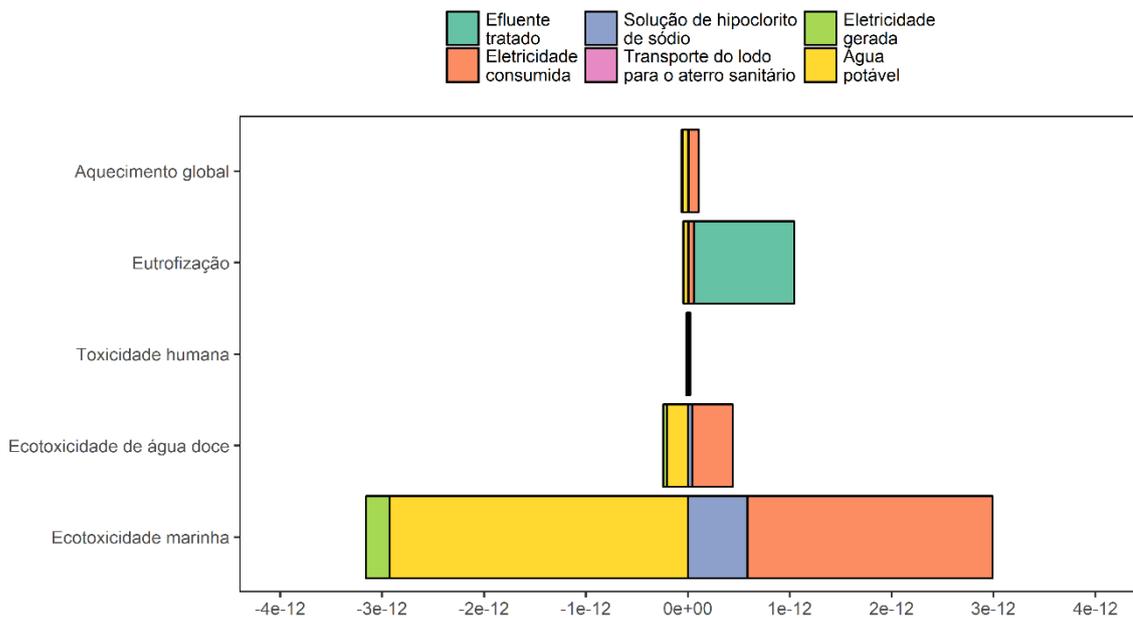
A Figura 5.9 e a Figura 5.10 apresentam, respectivamente, os resultados da caracterização e normalização da AICV do cenário 5. O respectivo ICV detalhado é apresentado no Apêndice F.

Figura 5.9 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 5 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.10 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 5 de operação da ETE



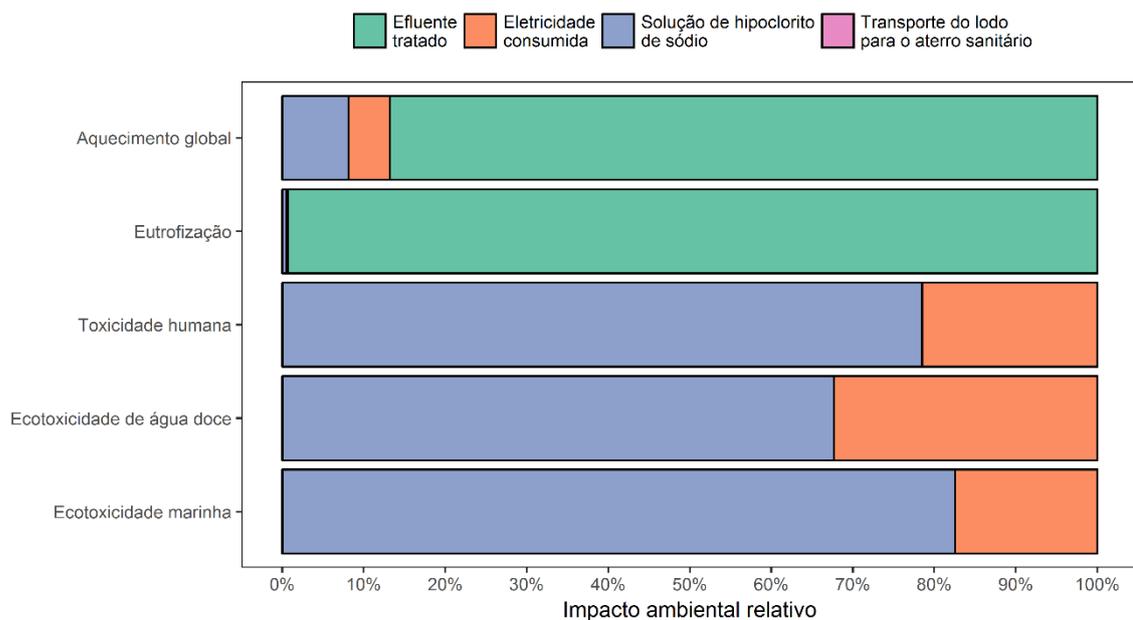
Fonte: Próprio autor.

Em todas as categorias avaliadas, em relação ao cenário 4, observou-se um aumento na contribuição da eletricidade nos impactos, nas categorias aquecimento global (7%), eutrofização (1%), toxicidade humana (13%), ecotoxicidade de água doce (9%) e ecotoxicidade marinha (15%). Visto que o ciclo produtivo de 1 kWh está associado com a emissão de diversas substâncias que apresentam potenciais impactos nas distintas categorias analisadas, o uso da desinfecção por UV acarretou o aumento nos impactos normalizados, em relação ao cenário onde a desinfecção é realizada com cloro, de 42% na categoria aquecimento global, de 1% na categoria eutrofização, de 17% na categoria toxicidade humana, de 34% na categoria ecotoxicidade de água doce e de 31% na categoria ecotoxicidade marinha.

5.7 Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 6

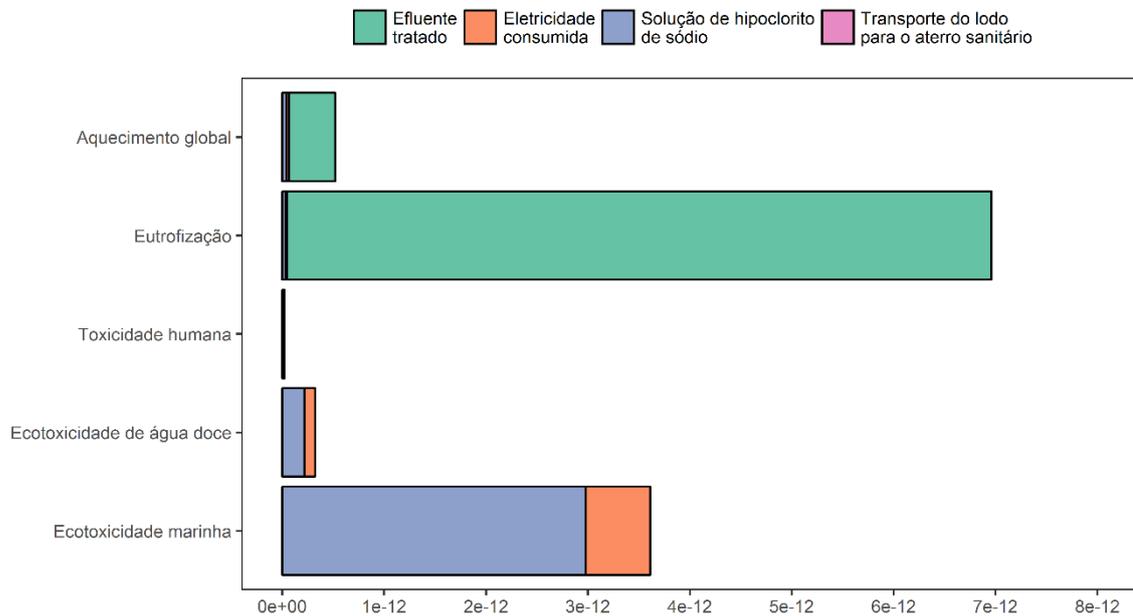
A Figura 5.11 e a Figura 5.12 apresentam, respectivamente, os resultados da caracterização e normalização da AICV do cenário 6. O respectivo ICV detalhado é apresentado no Apêndice G.

Figura 5.11 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 6 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.12 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 6 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Em comparação com o cenário 1, que corresponde à fase 1 de monitoramento da ETE, verifica-se a diminuição da contribuição da eletricidade em todas as categorias de impacto avaliadas, dado que o sistema de aeração do FAS permaneceu desligado. As reduções foram de 18% na categoria aquecimento global, 51% na categoria toxicidade humana, 60% na categoria ecotoxicidade de água doce e 50% na categoria ecotoxicidade marinha.

Também foi possível observar o aumento da contribuição da solução de hipoclorito de sódio nos impactos de ciclo de vida, sobretudo nas categorias relacionadas à toxicidade. Tal aumento está relacionado não somente à diminuição da contribuição da eletricidade, como também à quantidade de solução do desinfetante utilizada, uma vez que a dosagem obtida por Silva (2018) para o efluente anaeróbio, 30 mg/L, é superior à dosagem estimada para o efluente aeróbio, de 10 mg/L.

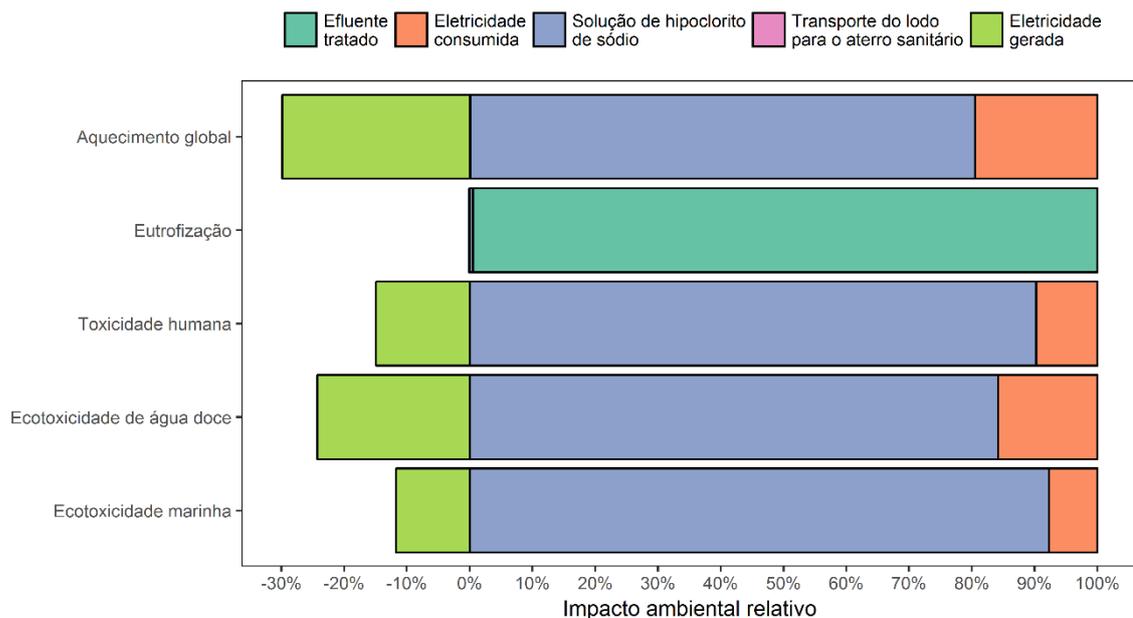
Ao se analisar os dados normalizados, em comparação com o cenário 1, houve um aumento de 33% nos impactos na categoria aquecimento global, em função do maior volume de metano emitido durante a fase 2; de 8% na categoria eutrofização, uma vez que a concentração de nutrientes no efluente final foi maior na fase 2 e de 15% na categoria ecotoxicidade marinha, devido à maior quantidade da solução de hipoclorito de sódio utilizada na desinfecção. Já na categoria ecotoxicidade de água

doce, ocorreu uma diminuição de 25% nos impactos, em função do menor consumo de eletricidade, cujos impactos associados ao ciclo produtivo contribuem de forma significativa nessa categoria. Já na categoria toxicidade humana, não houve alterações.

5.8 Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 7

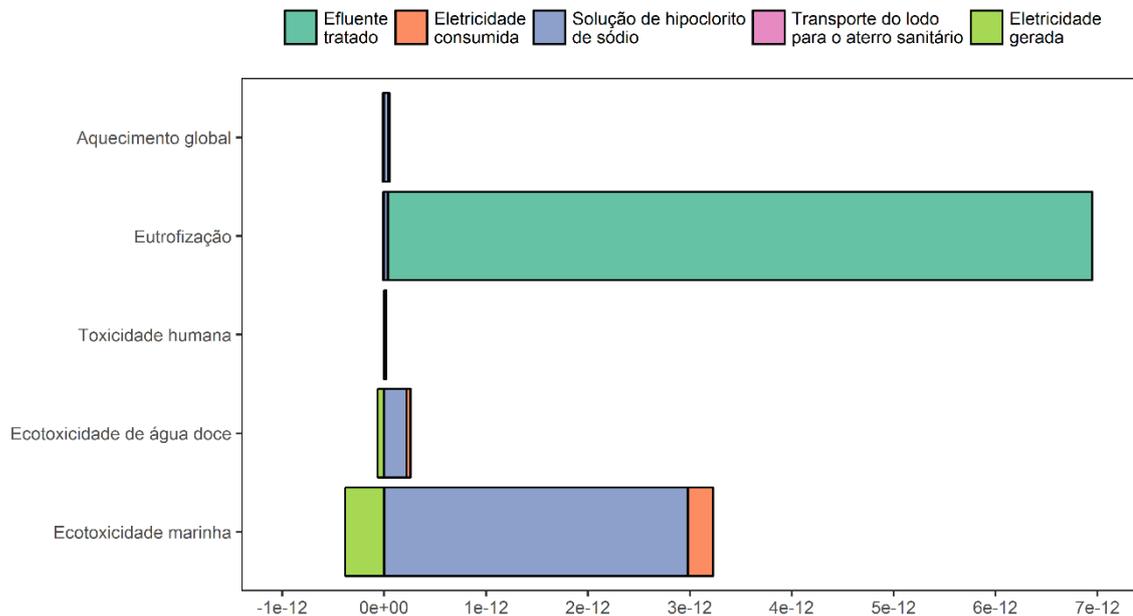
A Figura 5.13 e a Figura 5.14 apresentam, respectivamente, os resultados da caracterização e normalização da AICV do cenário 7. O respectivo ICV detalhado é apresentado no Apêndice H.

Figura 5.13 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 7 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.14 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 7 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

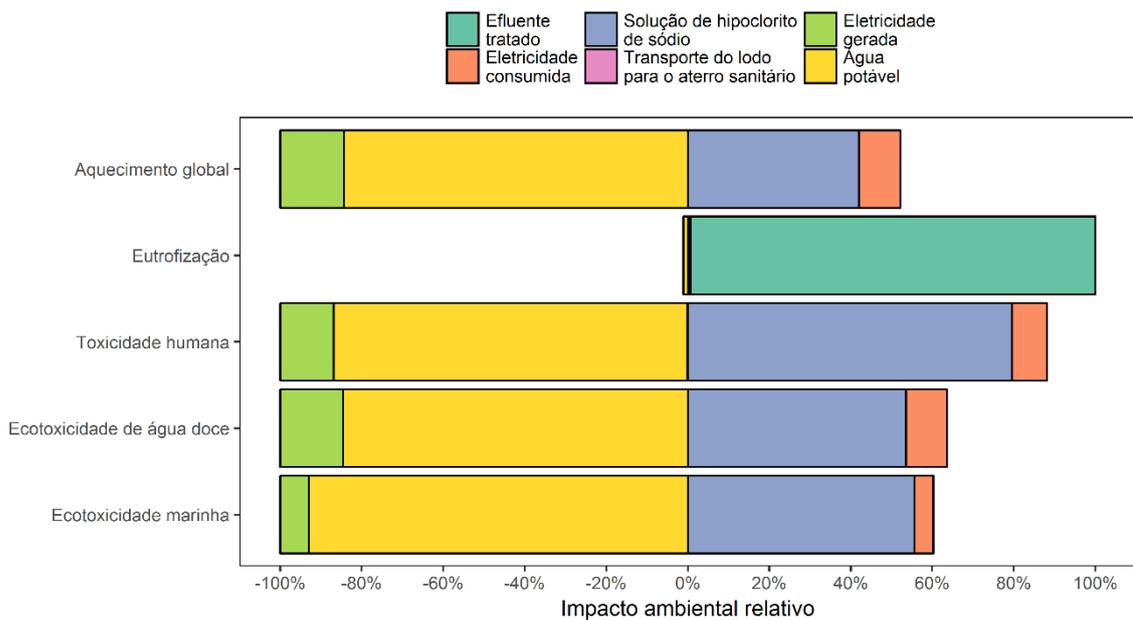
Em comparação com o cenário 6, devido ao aproveitamento do biogás dos reatores anaeróbios, não se observa mais a contribuição elevada do efluente final nos impactos da categoria aquecimento global. Dessa forma, o uso da solução de hipoclorito de sódio passou a ser responsável por 80% dos impactos nessa categoria. Também em virtude da menor quantidade de energia consumida a partir da rede elétrica, em comparação com o cenário 6, houve um aumento da contribuição da solução de hipoclorito de sódio de 12% na categoria toxicidade humana, de 16% na categoria ecotoxicidade de água doce e de 9% na categoria ecotoxicidade marinha.

A eletricidade gerada a partir do aproveitamento do biogás dos reatores anaeróbios, assim como no cenário 2, proporcionou impacto positivo de 26% na categoria aquecimento global, 15% na categoria toxicidade humana e 12% na categoria ecotoxicidade marinha. Ao se comparar os resultados normalizados com o cenário 6, verifica-se uma diminuição dos impactos de 93% na categoria aquecimento global, 26% na categoria toxicidade humana, 39% na categoria ecotoxicidade de água doce, de 21% na categoria ecotoxicidade marinha. Na categoria eutrofização, dado que os impactos associados ao uso da eletricidade apresentam pouca relevância nessa categoria, a redução foi desprezível.

5.9 Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do cenário 8

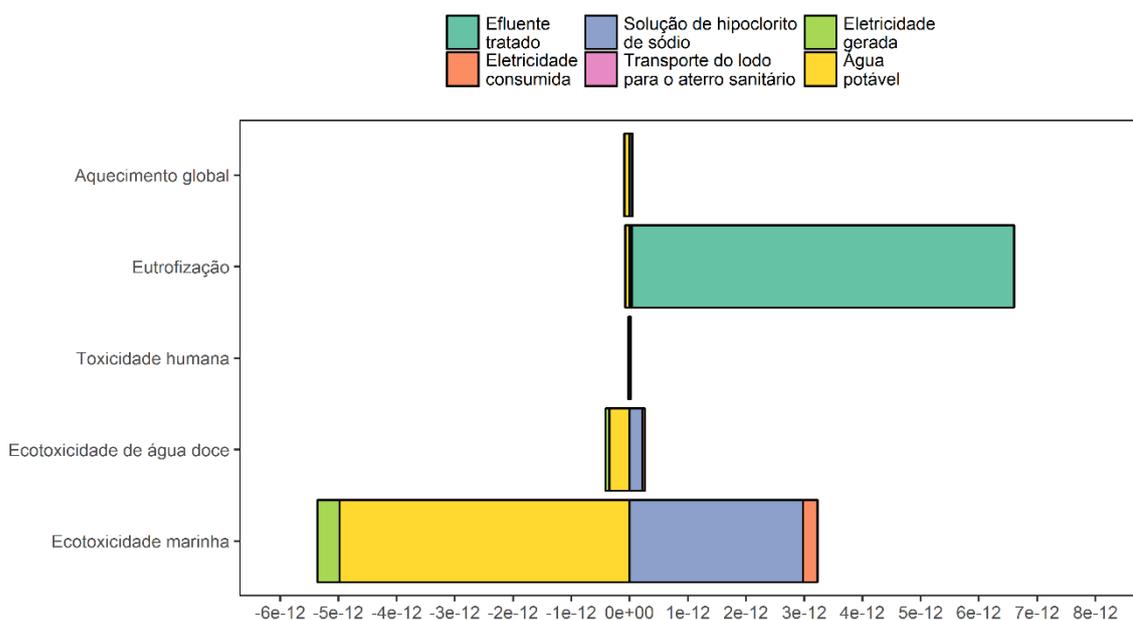
A Figura 5.15 e a Figura 5.16 apresentam, respectivamente, os resultados da caracterização e normalização da AICV do cenário 8. O respectivo ICV detalhado é apresentado no Apêndice I.

Figura 5.15 - Resultados da caracterização dos impactos de ciclo de vida do cenário 8 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.16 - Resultados da normalização dos impactos de ciclo de vida do cenário 8 de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

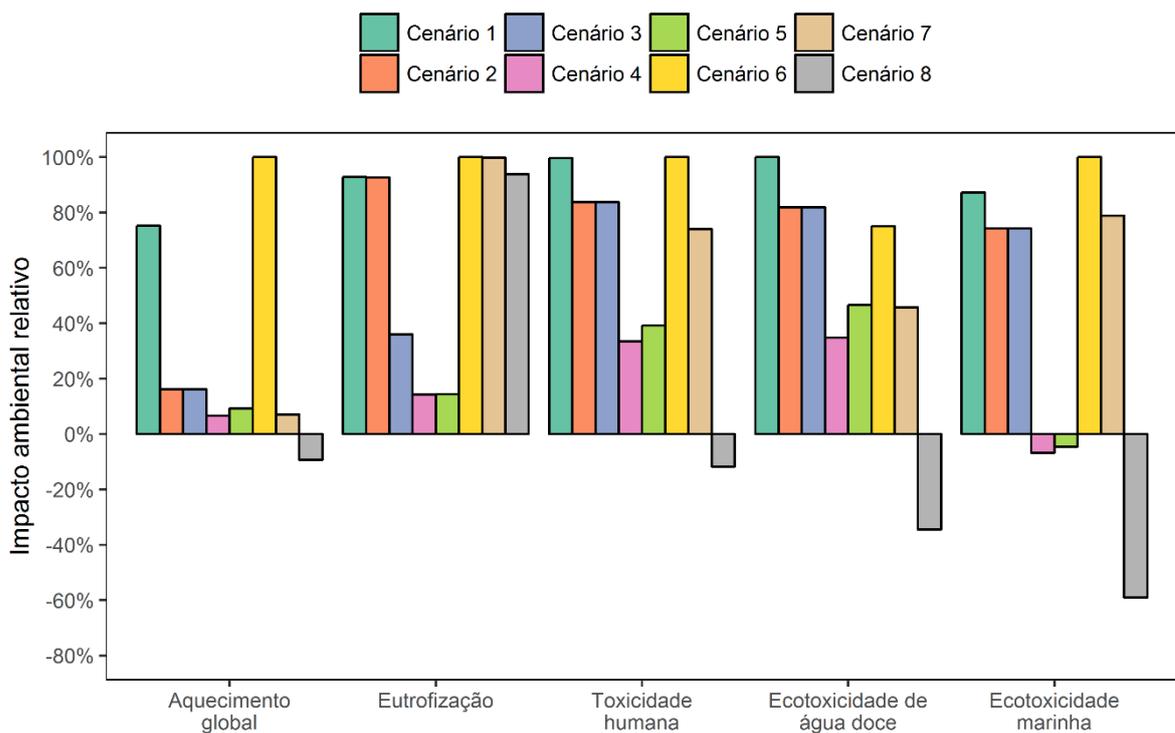
O reúso de toda a água tratada, juntamente com a energia gerada a partir do aproveitamento do biogás na ETE foram responsáveis por impactos positivos de 100% em todas as categorias de impacto, com exceção da eutrofização. Ao se comparar os resultados normalizados com o cenário 7, a redução foi de 100% nas categorias aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce e ecotoxicidade marinha, nas quais os impactos passaram a ser positivos, e de 6% na categoria eutrofização.

Verifica-se, portanto, que o reúso de toda a água tratada, na maioria das categorias, foi responsável por impactos positivos. Contudo, ao se avaliar os impactos normalizados, as concentrações elevadas de nutrientes no efluente final implicaram um impacto na categoria eutrofização ainda superior ao impacto positivo observado na categoria ecotoxicidade marinha.

5.10 Comparação entre os cenários

A Figura 5.17 apresenta a comparação entre os cenários de operação avaliados e seus potenciais impactos ambientais de ciclo de vida.

Figura 5.17 - Comparação dos impactos de ciclo de vida entre os cenários de operação



Fonte: Próprio autor.

Em relação aos cenários reais de operação avaliados, embora o menor consumo de eletricidade verificado no cenário 6 possa sugerir, à primeira vista, um melhor desempenho ambiental, o resultado obtido indicou que esse cenário apresentou maior impacto de ciclo de vida em quase todas as categorias avaliadas. As principais razões de tal desempenho estão relacionadas à maior quantidade de metano emitida pelos reatores anaeróbios durante a fase 2 de monitoramento, que apresentou elevada contribuição na categoria aquecimento global; à maior concentração de nutrientes presente no efluente final, que apresentou elevada contribuição na categoria eutrofização, e à maior quantidade utilizada da solução de hipoclorito de sódio, que apresentou elevada contribuição nas categorias toxicidade humana e ecotoxicidade marinha. A única categoria em que o menor consumo de energia acarretou menor impacto foi a ecotoxicidade de água doce.

Ao se comparar os cenários reais de operação com os cenários hipotéticos, onde foram propostos distintos potenciais ganhos ambientais, verifica-se que o aproveitamento do metano, presente no biogás produzido pelos reatores anaeróbios, para a geração de energia elétrica a ser utilizada na própria ETE, proporcionou significativa redução dos potenciais impactos de ciclo de vida, principalmente na categoria aquecimento global, uma vez que esse gás possui um potencial de aquecimento global elevado. Contudo, em razão da escala, tal prática pode não ser viável técnica e economicamente, visto que a geração de energia a partir do biogás gerado em ETE envolve a aquisição de equipamentos importados, a contratação de mão de obra especializada e a necessidade de limpeza e tratamento do biogás em função da presença de substâncias prejudiciais ao processo, como o sulfeto de hidrogênio e os siloxanos.

No cenário 3, a melhoria do desempenho operacional da ETE, com a remoção adequada de matéria orgânica e nitrogênio, proporcionou melhorias no desempenho ambiental apenas na categoria eutrofização. Apesar de esse cenário considerar também o aproveitamento do metano para geração de energia elétrica, verifica-se que uma operação comprometida com o desempenho operacional das unidades de tratamento pode acarretar significativa redução de potenciais impactos de ciclo de vida, uma vez que essa categoria apresentou valor normalizado de impacto muito elevado, em relação às outras categorias analisadas.

Os cenários 4 e 5, nos quais, além da melhoria operacional, seriam empregadas duas alternativas circulares de aproveitamento de recursos, com base na concepção original da ETE (Reatores anaeróbios + FAS+DS), apresentaram melhor desempenho ambiental de ciclo de vida, principalmente na categoria eutrofização, devido ao menor volume de efluente tratado disposto diretamente no corpo hídrico adjacente à escola.

Embora o cenário 4, cuja desinfecção do efluente final seria realizada por meio da aplicação de solução de hipoclorito de sódio, tenha apresentado melhor desempenho do que o cenário 5, onde a desinfecção seria realizada por meio de raios UV, vale ressaltar que esse método apresenta elevada robustez na inativação de organismos patogênicos, não gera subprodutos tóxicos e não representa riscos aos operadores no seu manuseio. Entretanto, deve-se verificar também a sua viabilidade técnica e econômica, além de uma realizar uma avaliação quantitativa de risco microbiológico das duas alternativas de desinfecção.

O desempenho ambiental do cenário 7 apresentou comportamento similar ao cenário 2, onde apenas o aproveitamento do biogás dos reatores anaeróbios seria empregado. Entretanto, os impactos do cenário 7, nas categorias aquecimento global, toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce, foram menores do que o cenário 2, em função da maior quantidade de metano gerada durante a fase 2, o que acarretou, conseqüentemente, uma maior produção de energia. No entanto, na categoria ecotoxicidade marinha, o impacto desse cenário foi maior que o cenário 2 devido à maior quantidade de solução de hipoclorito de sódio utilizada na desinfecção do efluente final.

O cenário 8, cuja proposta de aproveitamento de recursos foi a recuperação de energia elétrica a partir do biogás e o uso total do efluente tratado na irrigação das áreas verdes da instituição, com exceção da categoria eutrofização, apresentou impactos positivos em todas as categorias avaliadas, principalmente naquelas relacionadas à toxicidade, onde a produção de água tratada, produto evitado nesse cenário, apresenta grande impacto. Contudo, na categoria eutrofização, onde os impactos normalizados foram maiores em todos os cenários, o impacto desse cenário foi muito superior aos cenários 4 e 5, nos quais se realizou o reúso de cerca de 60% da água tratada. A principal razão desse resultado está associada à elevada concentração de nitrogênio no efluente final, dado que a combinação de processos anaeróbios de tratamento não é capaz de remover tal nutriente do esgoto bruto e que,

também, todo o efluente final é devolvido ao ambiente natural, ao contrário dos cenários 4 e 5, que devolve ao ambiente natural cerca de 40% da água tratada.

Dessa forma, observa-se que o emprego da prática do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos na ETE implicou melhores desempenhos de ciclo de vida, em relação aos cenários correspondentes às fases 1 e 2 de monitoramento, sobretudo nos cenários onde houve significativa redução de disposição direta de efluentes no ambiente natural (cenários 4 e 5).

Os resultados obtidos foram similares àqueles obtidos por Buonocore *et al.*, (2018), os quais avaliaram o desempenho ambiental de uma ETE centralizada situada na Itália, por meio da aplicação da ACV. Ao se comparar os impactos do cenário convencional de operação, com outros onde foram propostos crescentes níveis de aproveitamento de recursos, os autores também verificaram que o cenário onde o fluxo de recursos era mais circular, proporcionou menores impactos de ciclo de vida.

Cornejo *et al.* (2016) também concluíram, ao se comparar os impactos de ciclo de vida das fases de construção e operação de três ETE de escalas distintas – on site, cluster e centralizada – que a recuperação integrada de recursos nas ETE, por meio do aproveitamento de água, da reciclagem de nutrientes e da geração de energia, proporcionou a diminuição dos impactos de ciclo de vida em todas as escalas consideradas. Dentre elas, o reúso da água tratada apresentou maior relevância na diminuição dos impactos.

Por meio dos resultados, também foi possível identificar as principais entradas e saídas com significativa influência na redução dos impactos de ciclo de vida da fase de operação da ETE. A principal identificada foi a disposição de nutrientes no efluente final tratado, uma vez que foi responsável por quase a totalidade dos impactos observados na categoria eutrofização. No cenário 4, onde houve uma redução da disposição dessas substâncias em função da remoção de 70% de nitrogênio e do reúso da água tratada, a redução do impacto normalizado, em relação ao cenário 1, foi de 72%.

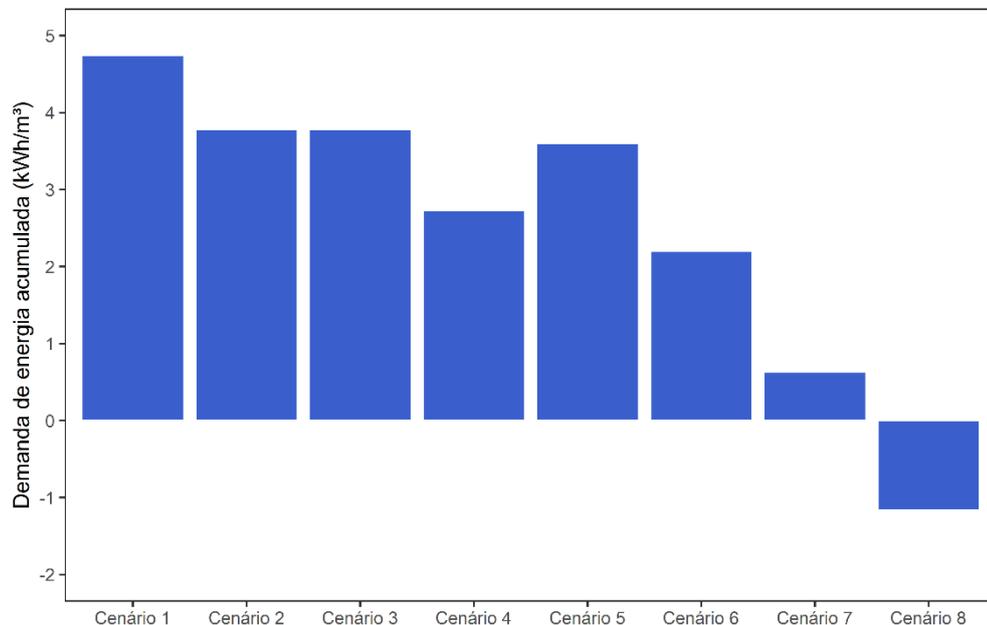
Outras entradas e saídas identificadas, com significativa influência na redução dos impactos de ciclo de vida da fase de operação da ETE, foram o consumo de energia elétrica, tendo em vista que, em quase todos os cenários, foi o maior contribuinte dos impactos nas categorias de toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce e

marinha, e a emissão de metano diretamente para a atmosfera pelos reatores anaeróbios, visto que, com o aproveitamento desse gás para a geração de energia, a diminuição do impacto normalizado foi de 78% em relação à fase 1 de monitoramento e de 93% em relação à fase 2 de monitoramento.

5.10.1 Indicador de eficiência energética – CED

A Figura 5.18 apresenta os resultados da demanda de energia acumulada dos cenários de operação da ETE.

Figura 5.18 – Demanda de energia acumulada dos cenários de operação da ETE



Fonte: Próprio autor.

O uso da eletricidade nas atividades da ETE foi o principal responsável pelo resultado da demanda de energia acumulada em todos os cenários. No cenário 1, cuja demanda foi de 4,75 kWh/m³, o consumo de eletricidade na ETE foi responsável por 94% desse valor. Ao se comparar com o cenário 6, no qual o consumo de energia elétrica foi menor, a redução da demanda de energia acumulada foi de 54%. O valor obtido nesse último cenário, de 2,20 kWh/m³, está associado, principalmente, ao consumo de energia elétrica (59%) e quantidade de solução de hipoclorito utilizada (41%).

Em relação aos cenários reais de operação, os cenários hipotéticos 4 e 8, cujos fluxos de recursos foram mais circulares, apresentaram menores demandas de energia acumulada. Contudo, o cenário hipotético com melhor desempenho foi o cenário 8, com pontuação final

de 1,16 kWh/m³. O principal fator responsável por esse resultado, além do menor consumo de energia elétrica, foi a água potável evitada, tendo em vista que o seu ciclo produtivo está associado a grande utilização, direta e indireta, de energia.

5.11 Limitações do estudo

Embora as emissões de metano dos reatores anaeróbios da ETE tenham sido estimadas por meio de um modelo matemático confiável, destaca-se a necessidade de utilizar dados reais de medição da vazão do biogás gerado, de forma a reduzir as incertezas associadas, dado que a categoria de aquecimento global é importante na análise de impactos de ciclo de vida de ETE. Todavia, apesar de a Norma Brasileira 12.209/2011 (ABNT, 2011), que versa sobre a elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários, recomendar a medição da vazão do biogás produzidos nos reatores anaeróbios, tal prática não é comum na realidade das ETE descentralizadas.

Apesar de a ferramenta de avaliação do ciclo de vida ter fornecido resultados relevantes acerca do desempenho ambiental da ETE, é importante destacar que a mesma ainda apresenta algumas limitações, que podem interferir nos resultados. As principais dizem respeito à falta de regionalização da modelagem, pois quase a totalidade do banco de dados do *Ecoinvent*[®] ainda é baseada em dados Europeus, o que aumenta o valor das incertezas associadas. Outra limitação importante diz respeito à ferramenta ainda não considerar a emissão de organismos patogênicos para a água, assim como não considerar as características do corpo hídrico onde as substâncias serão dispostas.

Uma outra proposta de aproveitamento de recursos que poderia ter sido considerada é o uso do efluente final na agricultura, em função da sua elevada concentração de nutrientes, minimizando, portanto, o uso de fertilizantes agrícolas. Contudo, essa alternativa não foi considerada, uma vez que a instituição está situada em zona urbana e, portanto, distante dos locais de produção de alimentos.

Embora Lopes *et al.* (2017) tenha verificado, por meio de revisão de literatura, que diversos estudos de ACV aplicados em ETE centralizadas concluíram que os impactos ambientais ocorridos nas etapas de construção e descomissionamento são

significativamente menores que aqueles ocorridos na etapa de operação, destaca-se a necessidade de verificar se tal conclusão também se aplica às ETE descentralizadas, em razão da diminuição de escala. Contudo, não foi possível avaliar tal influência nesse estudo, em função da ausência de dados dessas etapas.

6 CONCLUSÕES

A partir desse estudo, foi possível concluir que:

Em relação aos cenários reais de operação, o desligamento do sistema de aeração do FAS, embora seja vantajoso do ponto de vista da demanda de energia acumulada, não implicou melhoria no desempenho ambiental de ciclo de vida da ETE, uma vez que proporcionou aumento nos impactos normalizados das categorias aquecimento global (33%), eutrofização (8%) e ecotoxicidade marinha (15%), provocados em função da maior concentração de nutrientes e da maior dosagem de hipoclorito de sódio no efluente final, observadas durante a fase 2 de monitoramento.

A partir dos resultados dos impactos do cenário 3, foi possível concluir que a operação da ETE, quando realizada adequadamente, pode acarretar significativa redução de impacto de ciclo de vida, dado que esse cenário propôs uma remoção de 70% do nitrogênio amoniacal presente no esgoto bruto e que a redução no valor do impacto normalizado na categoria eutrofização foi de 61%, ao se comparar com os cenários 1 e 2.

Os cenários 4 e 5, que propuseram um maior aproveitamento de recursos, em relação à fase 1 de monitoramento, apresentaram menores impactos de ciclo de vida na maioria das categorias analisadas, sobretudo nas categorias ecotoxicidade marinha e eutrofização. Todavia, o aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica a ser utilizada no funcionamento da ETE pode não ser técnica e economicamente viável, em função da escala da ETE, do elevado custo dos equipamentos e da complexidade operacional.

O cenário 8, que propôs um maior aproveitamento de recursos em relação à fase 2 de monitoramento, por meio da recuperação de energia a partir do biogás e do uso total do efluente tratado na irrigação das áreas verdes da instituição, apresentou impactos positivos em quase todas as categorias avaliadas, principalmente naquelas relacionadas à toxicidade, onde a produção de água tratada, produto evitado nesse cenário, apresenta grande impacto. Contudo, na categoria eutrofização, onde os impactos normalizados foram maiores em todos os cenários, o impacto desse cenário foi muito superior aos cenários 4 e 5, nos quais se realizou o reúso de cerca de 60% da água tratada.

Foram identificadas como principais entradas e saídas com maior influência na redução dos impactos de ciclo de vida, a disposição final de nutrientes no ambiente, uma vez que são responsáveis por quase a totalidade dos impactos observados na categoria eutrofização, o consumo de energia elétrica, que apresentou maior contribuição nos impactos das categorias toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce e marinha, além de elevada contribuição para o valor final da demanda de energia acumulada em cada cenário, e a emissão de metano para a atmosfera, cujas reduções dos impactos observadas foram de 78% em relação à fase 1 de monitoramento e de 93% em relação à fase 2 de monitoramento.

Os cenários hipotéticos com maiores práticas de aproveitamento de recursos apresentaram menores valores de demanda de energia acumulada, em relação aos cenários reais de operação. O menor consumo de energia elétrica, associado ao volume de água evitada, cujo processo produtivo apresenta um elevado uso de energia, foram os principais responsáveis por esse resultado.

Portanto, quando são consideradas práticas mais circulares de fluxo de recursos, há uma redução significativa dos impactos em todas as categorias de impacto analisadas, principalmente quando se efetua o reúso parcial e total do efluente tratado. Além disso, essas práticas também acarretam o aumento da eficiência energética da ETE, no momento em que foi observada a redução da demanda de energia acumulada. Assim, a ETE pode ser otimizada, em termos de desempenho ambiental, não somente a partir de ações de melhoria do desempenho operacional, mas também a partir do aproveitamento de recursos presentes no esgoto ou em seus subprodutos.

7 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

- Recomenda-se realizar um estudo de viabilidade técnica e econômica na ETE, para a realização das práticas do saneamento voltado para o aproveitamento de recursos propostas nesse trabalho;
- Recomenda-se realizar a ACV da fase de operação da mesma ETE, contudo considerando a segregação da urina na fonte, com vistas à recuperação de nitrogênio e utilização na agricultura;
- Recomenda-se realizar um estudo de avaliação quantitativa de risco microbiológico (QRMA) das duas alternativas de desinfecção do efluente final propostas na ETE, cloração e raios UV;
- Recomenda-se realizar um estudo de otimização do funcionamento da ETE da ETE, baseado nos dados da série temporal de vazão afluente e no emprego de inversores de frequência;
- Recomenda-se a realização de um estudo acerca da qualidade e da quantidade de biogás gerado nos reatores anaeróbios da ETE.

8 REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR ISO 14.044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 12.209/2011**: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **CB-02/2018**: Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações. 2018. Rio de Janeiro, 2018. No prelo.

ALVES, D.A. **Avaliação do ciclo de vida – ACV de um sistema de wetland construído de fluxo vertical para o tratamento de esgoto doméstico**. 2016. 82 f. Dissertação (mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION (WEF). Standard methods for the examination of water and wastewater. 23. ed., Washington, APHA/AWWA/WEF, 2017.

BARROS, J.C.G.; ILHA, M.S.O.; YWASHIMA, L.A.; SANTOS, F.M. Avaliação do desperdício e da intensidade de utilização de água em edifícios escolares públicos. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1., ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, São Paulo. **Anais...** Disponível em: <ftp://ip20017719.eng.ufjf.br/Public/AnaisEventosCientificos/ENTAC_2004/trabalhos/PAP0956d.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2018.

BATSTONE, D.J.; HÜLSEN, T; MEHTA, C.M.; KELLER, J. Platforms for energy and nutrient recovery from domestic wastewater: A review. **Chemosphere**, v. 140, p. 2-11, 2015.

BORSUK, M.E.; MAURER, M.; LIENERT, J.; LARSEN, T.A. Charting a Path for innovative toilet technology using multicriteria decision analysis. **Environmental Science Technology**, v. 42, n. 6, p. 1855-1862, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 08 dez. 2017.

_____. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018. 220 p. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2016/Diagnostico_AE2016_Retificado.zip>. Acesso em: 04 abr 2018.

BUONOCORE, E.; MELLINO, S.; DE ANGELIS, G.; LIU, G.; ULGIATI, S. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. **Ecological Indicators**, v. 93, n. 3, p. 13-23, 2018.

CAPODAGLIO, A.G. Integrated, Decentralized Wastewater Management for Resource Recovery in Rural and Peri-Urban Areas. **Resources**, v. 6, n. 22, p. 1 –20, 2017.

CAPODAGLIO, A.G.; CALLEGARI, A.; CECCONET, D.; MOLOGNONI, D. Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies. **Water Practice & Technology**, v. 12, n. 2, p. 463-477, 2017.

CHERNICHARO, C.A.L.; VAN LIER, J.B.; NOYOLA, A.; BRESSANI RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of art, constraints and challenges. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 14, n. 4, p. 649-679, 2015.

CHIRISA, I.; BANDAUKO, E.; MATAMANDA, A.; MANDISVIKA, G. Decentralized domestic wastewater systems in developing countries: the case study of Harare (Zimbabwe). **Applied Water Science**, v. 7, n. 3, p. 1069-1078, 2017.

CORNEJO, P.K.; ZHANG, Q.; MIHELICIC, J.R. How does scale of implementation impact the environmental sustainability of wastewater treatment integrated with resource recovery? **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 13, p. 6680-6689, 2016.

COROMINAS, L.; FOLEY, J.; GUEST, J.S.; HOSPIDO, A.; LARSEN, H.F.; MORERA, S.; SHAW, A. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. **Water research**, v. 47, n. 15, p. 5480-5492, 2013.

CRITES, R.W.; TCHOBANOGLOUS, G. Small and decentralized wastewater management systems. New York: McGraw-Hill, 1998.

DAIGGER, G.T. Evolving urban water and residuals management paradigms: water reclamation and reuse, decentralization and resource recovery. **Water Environmental Research**, v. 81, n. 8, p. 809-823, 2009.

EMMERSON, R.; MORSE, G.; LESTER, J.; EDGE, D. The Life Cycle Analysis of Small-Scale Sewage-Treatment Processes. **Water and Environment Journal**, v. 9, p. 317-325, 1995.

ETNIER C., PINKHAM, R., CRITES, R., JOHNSTONE, D.S., CLARK, M. e MACRELLIS, A. Overcoming barriers to evaluation and use of decentralized wastewater technologies and management. *Water and Environment Research*

Foundation. 2007. Disponível em: <<http://ndwrcdp.werf.org/documents/04-DEC-2/04-DEC-2full.pdf>>. Acesso em: 04 dez, 2017.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. The Water-Energy-Food Nexus - a new approach in support of food security and sustainable agriculture. Rome, 2014. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-bl496e.pdf>>. Acesso em: 30 dez. 2017.

FERREIRA, L. S. **Avaliação de desempenho de wetlands construídos para o tratamento de efluente de reator UASB: Estudo de caso da ETE Vog Ville**. 2013. 74 f. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

FLORENCIO, L.; ALMEIDA, P.G.S.; MENDONÇA, N.M.; VOLSHAM JR, I.; ANDRADE NETO, C.O.; PIVELI, R.P.; CHERNICHARO, C.A.L. Nitrificação em reatores aeróbios com Biomassa aderida. In: MOTA, F.S.B. e VON SPERLING, M. Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção. FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 428 p, 2009.

FOLEY, J.; DE HAAS, D.; HARTLEY, K.; LANT, P. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. **Water research**, v. 44, n. 5, p. 1654-1666, 2010.

GALLEGO, A.; HOSPIDO, A.; MOREIRA, M.T.; FEIJOO, G. Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, p. 931-940, 2008.

GARCIA, S.N., CLUBBS, R.L., STANLEY, J.K., SCHEFFE, B., YELDERMAN JR., J.C., BROOKS, B.W. Comparative Analysis of effluent water quality from a municipal treatment plant and two on-site wastewater treatment systems. **Chemosphere**, v. 92, n. 1, p. 38-44, 2013.

GARFÍ, M.; FLORES, L.; FERRER, I. Life cycle assessment of wastewater treatment systems for small communities: activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. **Journal of cleaner production**, v. 161, p. 211-219, 2017.

GARZÓN-ZUÑIGA, M.A.; BUELNA, G. Treatment of wastewater from a school in a decentralized filtration system by percolation over organic packing media. **Water Science & Technology**, v. 64, n. 5, p. 1169-1177, 2011.

GAUSS, M. Constructed Wetlands: A promising wastewater treatment system for small localities - Experiences from Latin America. 2008. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/pt/224061468046774032/pdf/441200WSP0BOX31ed0wetlands01PUBLIC1.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2018.

GOEDKOOP, M.; OELE, M.; LEIJTING, J.; PONSIOEN, T.; MEIJER, E. Introduction to LCA with SimaPro, ed. Pré, Amersfoort, 2016.

GOMES, B.G.L.A. **Tratamento de esgoto de pequena comunidade utilizando tanque séptico, filtro anaeróbio e filtro de areia**. 2015. 138 f. Dissertação

(mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

GRANT, S.B.; SAPHORES, J.; FELDMAN, D.L.; HAMILTON, A.J.; FLETCHER, T.D.; COOK, P.L.M.; STEWARDSON, M.; SANDERS, B.F.; LEVIN, L.A.; AMBROSE, R.F.; DELETIC, A.; BROWN, R.; JIANG, S.C.; ROSSO, D.; COOPER, W.J.; MARUSIC, I. Taking the "waste" out of "wastewater" for human water security and ecosystem sustainability. **Science**, v. 337, p. 681-686, 2012.

GUEST, J.S.; SKERLOS, S.J.; BARNARD, J.L.; BECK, M.B.; DAIGGER, G.T.; HILGER, H.; JACKSON, S.J.; KARVAZY, K.; KELLY, L.; MACPHERSON, L.; MIHELICIC, J.R.; PRAMANIK, A.; RASKIN, L.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M.; YEH, D.; LOVE, N.G. A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater. **Environmental Science Technology**, v. 43, p. 6126-6130, 2009.

GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M.A.J. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISSO standards. Part III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692 p., 2002.

GUTIERREZ, K.G. **Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida**. 2014. 115 f. Tese (doutorado) – Escola de engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

HO, G. Technology for sustainability: the role of onsite, small and community scale technology. **Water Science & Technology**, v. 51, n. 10, p. 15-20, 2005.

HOSPIDO, A.; MOREIRA, M.; FERNÁNDEZ-COUTO, M.; FEIJOO, G. Environmental performance of a municipal wastewater treatment plant. **International Journal of Life Cycle Assessment**. V. 9, n. 4, p. 261-271, 2004.

JHANSI, S.C.; MISHRA, S.K. Wastewater Treatment and Reuse: Sustainability Options. **Consilience: The Journal of Sustainable Development**, v. 10, n. 1, 2013.

JORDÃO, E.P e PESSÔA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4 ed. Rio de Janeiro, 2005.

JUNGBLUTH, N e FRISCHKNECT, R. Part II: 2. Cumulative energy demand, in: Hischer, R., Weidema, B., Althaus, H.-J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Frischknecht, R., Hellweg, S., Humbert, S., Jungbluth, N., Köllner, T., Loerincik, Y., Margni, M., Nemecek, T. (Eds.), Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods.ecoinvent report no 3 v2.2, Dübendorf, p. 33-40, 2010.

KRAMER, R.D. **Avaliação do desempenho ambiental de uma ETE considerando a presença dos contaminantes emergentes**. 2016. 201 f. Tese (doutorado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

- LARSEN, T.A.; HOFFMAN, S.; LÜTHI, C.; TRUFFER, B.; MAURER, M. Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. **Science**, v. 352, n. 6288, p. 928-933, 2016.
- LI, Y.; LUO, X.; WANG, D.; ZHANG, W. Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: a case study in Suzhou, China. **Journal of cleaner production**, v. 57, p. 221-227, 2013.
- LIBRALATO, G., GHIRARDINI, A.V., AVEZZÙ, F. To centralize or to decentralize: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management, **Journal of Environmental Management**, v. 94, p. 61-68, 2012.
- LOBATO, L.C.S. **Aproveitamento energético de biogas gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. 184 f. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- LOMBARDO, P. Cluster Wastewater Systems Planning Handbook. 2004. Disponível em: <http://www.ndwrcdp.org/documents/WU-HT-01-45/WUHT0145_web1.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2017.
- LOPES, T.A.S. **Avaliação do ciclo de vida de uma ETE composta por reator UASB seguido de Wetlands construídos**. 2014. 136 f. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.
- LOPES, T.A.S.; KIPERSTOK, A.; ZANTA, V.M.; QUEIROZ, L.M. Revisão crítica da literatura sobre aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida ao tratamento de esgotos. **Revista DAE**, v. 65, n. 208, p. 47-55, 2017.
- 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, p. 652-659, 2009.
- MENDONÇA, A.A.J. **Avaliação de um sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos em escala real composto por tanque séptico e wetland construída híbrida**. 2015. 208 f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- METCALF & EDDY, INC. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. Tradução: Ivanildo Hespagnol, José Carlos Mierzwa.
- MO, W.; ZHANG, Q. Energy-nutrients-water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants. **Journal of Environmental Management**, v. 127, p. 255-267, 2013.
- MORENO-RUIZ, E.; LÉVOVÁ, T.; REINHARD, J.; VALSASINA, L.; BOURGAULT, G.; WERNET, G. Documentation of changes implemented in ecoinvent database v3.3. Ecoinvent, Zürich, Switzerland, 2016.
- OLIVEIRA JÚNIOR, JL. Tratamento descentralizado de águas residuárias domésticas: uma estratégia de inclusão social. In: LIRA, WS.; CÂNDIDO, GA.

(Orgs.). **Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa**. Campina Grande: EDUEPB, 2013, p. 213-232.

ORIGINAL AMBIENTAL Ltda. Projeto de Estação para tratamento de esgotos sanitários por sistema misto, anaeróbio e aerado, 2014.

OPHER, T.; FRIEDLER, E. Comparative LCA of decentralized wastewater treatment alternatives for non-potable urban reuse. **Journal of Environmental Management**, v.182, p. 464-476, 2016.

ORTH, H. Centralised versus decentralised wastewater systems?. **Water Science & Technology**, v. 56, n. 5, p. 259-266, 2007.

PAPA, M., FOLADORI, P., GUGLIELMI, L., BERTANZA, G. How far are we from closing the loop of sewage resource recovery? A real picture of municipal wastewater treatment plants in Italy. **Journal of Environmental Management**, v. 198, p. 9-15, 2017.

PÉCORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USB – Estudo de caso**. 2006. 152 p. Dissertação (mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia EP/FEA/IEE/IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PITUCO, M.M. **Sustentabilidade ambiental de um sistema de tratamento de águas residuais urbanas: uma avaliação do ciclo de vida**. 2017. 93 f. Dissertação (mestrado) – Escola Superior Agrária de Bragança, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2017.

POSSETTI, G.R.C.; CHERNICHARO, C.A.L.; CARNEIRO, C.; RIETOW, J.C.; LUCKOW, R.F.; WAISS, T.C.F.; SOUZA, C.L.; LOBATO, L.C.S. ProBio - Programa de estimativa de produção de biogás em reatores UASB, v. 1.0, 2015.

RENOU, S.; THOMAS, J.S.; Aoustin, E.; PONS, M.N. Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. **Journal of cleaner production**, v. 16, n. 10, p. 1098,1105, 2008.

RIBEIRO, J. **Avaliação de uma estação compacta de tratamento de esgoto sanitário composta por reator UASB – biofiltro aerado submerso**. 2016. 137 f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2016.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A; CHAPIN, F.S.; LAMBIN, E.F.; LENTON, T.M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; CHELLNHUBER, H.J.; NYKVIST, B.; DE WIT, C.A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P.K.; CONSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R.W.; FABRY, V.J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J.A. A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, p. 472-475, 2009.

SANTOS, A.M. **Tratamento descentralizado de esgotos domésticos em sistemas anaeróbios com posterior disposição do efluente no solo**. 2013. 82 f. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2013.

SHI, Y.; ZHOU, L.; XU, Y.; ZHOU, H.; SHI, L. Life cycle cost and environmental assessment for resource-oriented toilet systems. **Journal of cleaner production**, v. 196, p. 1188-1197, 2018.

SILVA, C.O. **Oxidação por cloro como pós-tratamento de efluentes anaeróbios**. 2018. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

SINGH, N.K.; KAZMI, A.A.; STARKL, M. A review on full-scale decentralized wastewater treatment systems: techno-economical approach. **Water Science & Technology**, v. 71, n. 4, p. 468-478, 2015.

SOUSA, H.H.S.S. **Avaliação do ciclo de vida e influência do tempo de vida útil dos postes de madeira e de concreto do sistema de distribuição de energia elétrica**. 2014. 158 f. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

SURIYACHAN, C.; NITIVATTANANON, V.; NURUL AMIN, A.T.M. Potential of decentralized wastewater management for urban development: Case of Bangkok. **Habitat International**, v. 36, n. 1, p. 85-92, 2012.

TCHOBANOGLIOUS, G.; RUPPE, L.; LEVERENZ, H.; DARBY, J. Decentralized wastewater management: challenges and opportunities for the twenty-first century. **Water Science & Technology: Water Supply**, v. 4, n. 1, 2004.

TEIXEIRA, R.M.; PEREIRA, I.N.A.; ARAÚJO, V.S. Análise da eficiência das estações de tratamento de esgoto (ETES) em residenciais multifamiliares na cidade de Manaus que possuem sistemas combinados anaeróbios – aeróbios. In: CONGRESSO BRASIL NORTE DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1., 2017, Belém. **Anais...** Disponível em: <<https://icongresso.itarget.com.br/tra/arquivos/esa.2/422.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

TREIN, C.M. **Monitoramento de sistemas descentralizados de wetlands construídos de fluxo vertical aplicados no tratamento avançado de esgotos**. 2015. 134 f. Dissertação (mestrado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Response to Congress on use of decentralized wastewater treatment systems. 1997. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/septic_rtc_all.pdf>. Acesso em: 12 out. 2017.

_____. Handbook for Managing Onsite and Clustered (Decentralized) Wastewater Treatment Systems – An introduction to management tools and information for

implementing EPA's Management Guidelines. 2005. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20017K2G.PDF?Dockey=20017K2G.PDF>>. Acesso em: 12 out. 2017.

_____. Life Cycle Assessment: principles and practice. 2006. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000L86.PDF?Dockey=P1000L86.PDF>>. Acesso em: 12 out. 2017.

VALENTE, V.B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil.** 2015. 182 f. Dissertação (mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VAN AFFERDEN, M.; CARDONA, J.A.; LEE, M.Y.; SUBAH, A.; MÜLLER, R.A. A new approach to implementing decentralized wastewater treatment concepts. **Water Science Technology**, v. 72, n. 11, p. 1923-1930, 2015.

VAN LOOSDRECHT, M.C.M.; BRDJANOVIC, D. Anticipating the next century of wastewater treatment. **Science**, v. 344, n. 6191, p. 1452-1453, 2014.

WANG, S. Values of decentralized systems that avoid investments in indle capacity within the wastewater sector: A theoretical justification. **Journal of Environmental Management**, v. 136, p. 68-75, 2014.

WENDLAND, C. Sustainable and productive sanitation is a perfect example of the Water Energy and Food Nexus, 2011. Disponível em: <<https://www.water-energy-food.org/news/nexus-blog-sanitation-and-the-nexus/>>. Acesso em: 16 ago 2018.

WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **The International journal of life cycle assessment**, v. 21, p. 1218-1230, 2016.

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

ZANG, Y; LI, Y.; WANG, C.; ZHANG, W.; XIONG, W. Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: a review. **Journal of cleaner production**, v. 107, p. 676-692, 2015.

APÊNDICE A – Resultados das análises físico-químicas das etapas de monitoramento da ETE

Parâmetro	Esgoto bruto				
	Média das concentrações (mg/L)	Desvio Padrão (mg/L)	Coefficiente de assimetria de Pearson	Coefficiente de Curtose	
Fase 1	DBO	399	172	0,53	-0,11
	DQO	765	159	-0,14	-1,24
	Nitrogênio amoniacal	104	14	0,22	0,01
	NTK	145	21	0,63	-1,02
	SST	264	93	0,87	-0,95
	Sulfato	40	5	-0,59	-0,81
	Fósforo total	10	1	-0,43	-0,77
	Fase 2	DBO	485	139	1,53
DQO		1024	270	0,80	-0,62
Nitrogênio amoniacal		101	101	-0,72	-0,71
NTK		137	7	-0,05	-0,47
SST		380	222	1,67	1,80
Sulfato		37	6	-0,31	-0,17
Fósforo total		11	2	2,40	7,59

		Efluente tratado			
Parâmetro	Media das concentrações (mg/L)	Desvio Padrão (mg/L)	Coefficiente de assimetria de Pearson	Coefficiente de Curtose	
Fase 1	DBO	48	25	0,27	-0,74
	DQO	137	28	-0,07	-1,59
	Nitrogênio amoniacal	112	15	0,85	-0,20
	NTK	121	15	0,87	-0,38
	SST	51	11	-0,10	-0,23
	Fósforo total	10	2	-0,25	-0,24
	Fase 2	DBO	64	37	1,15
DQO		208	33	1,69	5,93
Nitrogênio amoniacal		118	9	1,12	1,34
NTK		126	10	1,53	2,98
SST		51	11	-0,10	-0,23
Fósforo total		11	1	-1,45	2,81

Lodo dos reatores anaeróbios						
Parâmetro	Ponto de coleta	Média das Concentrações (g/L)	Desvio Padrão (g/L)	Coefficiente de assimetria de Pearson	Coefficiente de Curtose	
Reator anaeróbio 1	STV	Altura 1	9	9	1,69	2,20
		Altura 2	10	8	1,35	1,74
		Altura 3	4	7	2,65	7,49
Reator anaeróbio 2	STV	Altura 1	41	9	-0,05	0,60
		Altura 2	28	9	-0,96	0,93
		Altura 3	7	9	3,65	13,80

APÊNDICE B – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 1 de operação da ETE

Saída conhecida para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos		Total em 20 anos	Unidade funcional	
Efluente tratado		140.160 m ³	1 m ³	
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Hipoclorito de sódio	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state</i>	11.212,80 kg	0,080 kg/m ³	Estimado (Tabela 4.3)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	317.827,40 kWh	2,268 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.4)
Transporte do lodo para o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4</i>	106.262,17 kg.km	0,758 kg.km/m ³	Calculado (Tabela 4.6)
Emissões para o ar	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Metano (CH ₄)	<i>Methane, biogenic</i>	9.081,68 kgCH ₄	0,065 kgCH ₄ /m ³	Calculado (Tabela 4.8)
Emissões para a água	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	<i>COD, Chemical Oxygen Demand</i>	19.253,78 kg	0,137 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.7)
Sólidos em Suspensão	<i>Suspended solids, unspecified</i>	7.090,69 kg	0,051 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.7)
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	<i>Nitrogen, total</i>	16.943,94 kg	0,121 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.7)
Fósforo Total	<i>Phosphorus, total</i>	1.356,75 kg	0,010 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.7)
Cloro residual	<i>Chlorine</i>	70,08 kg	0,001 kg/m ³	Estimado (Tabela 4.7)

APÊNDICE C – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 2 de operação da ETE

Saída conhecida para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos		Total em 20 anos	Unidade funcional	
Efluente tratado		140.160 m ³	1 m ³	
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados	Processo SimaPro	Quantidade	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	34.543,60 kWh	0,246 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.9)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Hipoclorito de sódio	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state</i>	11.212,80 kg	0,080 kg/m ³	Estimado (Tabela 4.3)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	283.283,80 kWh	2,021 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.10)
Transporte do lodo para o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4</i>	106.262,17 kg.km	0,758 kg.km/m ³	Calculado (Tabela 4.6)
Emissões para a água	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	<i>COD, Chemical Oxygen Demand</i>	19.253,78 kg	0,137 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.7)
Sólidos em Suspensão	<i>Suspended solids, unspecified</i>	7.090,69 kg	0,051 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.7)
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	<i>Nitrogen, total</i>	16.943,94 kg	0,121 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.7)
Fósforo Total	<i>Phosphorus, total</i>	1.356,75 kg	0,010 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.7)
Cloro residual	<i>Chlorine</i>	70,08 kg	0,001 kg/m ³	Estimado (Tabela 4.7)

APÊNDICE D – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 3 de operação da ETE

Saída conhecida para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos		Total em 20 anos	Unidade funcional	
Efluente tratado		140.160 m ³	1 m ³	
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados	Processo SimaPro	Quantidade	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	34.543,60 kWh	0,246 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.9)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Hipoclorito de sódio	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state</i>	11.212,80 kg	0,080 kg/m ³	Estimado (Tabela 4.3)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	283.283,80 kWh	2,021 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.10)
Transporte do lodo para o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4</i>	106.262,17 kg.km	0,758 kg.km/m ³	Calculado (Tabela 4.6)
Emissões para a água	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	<i>COD, Chemical Oxygen Demand</i>	11.212,80 kg	0,080 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.11)
Sólidos em Suspensão	<i>Suspended solids, unspecified</i>	4.204,80 kg	0,030 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.11)
Nitrogênio Amoniacal	<i>Ammonia, as N</i>	4.725,77 kg	0,034 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.11)
Fósforo Total	<i>Phosphorus, total</i>	1.401,60 kg	0,010 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.11)
Cloro residual	<i>Chlorine</i>	70,08 kg	0,0005 kg/m ³	Estimado (Tabela 4.11)

APÊNDICE E – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 4 de operação da ETE

Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos		Total em 20 anos (m³)	Unidade funcional	
Efluente tratado		140.160	1 m³	
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados	Processo SimaPro	Quantidade	Correlação	Origem
Água tratada	<i>Tap water {RoW} market for</i>	82.233,60 m³	0,587 ton/m³	Calculado (Tabela 4.12)
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	34.543,60 kWh	0,246 kWh/m³	Calculado (Tabela 4.9)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Hipoclorito de sódio	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state</i>	11.212,80 kg	0,08 kg/m³	Estimado (Tabela 4.3)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	283.283,80 kWh	2,021 kWh/m³	Calculado (Tabela 4.10)
Transporte do lodo para o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4</i>	106.262,17 t.km	0,758 kg.km/m³	Calculado (Tabela 4.6)
Emissões para a água	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Demanda Química de Oxigênio	<i>COD, Chemical Oxygen Demand</i>	4.634,11 kg	0,033 kg/m³	Análises físico-químicas (Tabela 4.13)
Sólidos em Suspensão	<i>Suspended solids, unspecified</i>	1.737,79 kg	0,012 kg/m³	Análises físico-químicas (Tabela 4.13)
Nitrogênio Amoniacal	<i>Ammonia, as N</i>	1.953,10 kg	0,014 kg/m³	Análises físico-químicas (Tabela 4.13)
Fósforo Total	<i>Phosphorus, total</i>	579,26 kg	0,004 kg/m³	Análises físico-químicas (Tabela 4.13)
Cloro residual	<i>Chlorine</i>	28,96 kg	0,0002 kg/m³	Estimado (Tabela 4.13)

APÊNDICE F – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 5 de operação da ETE

Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos		Total em 20 anos (m ³)	Unidade funcional	
Efluente tratado		140.160	1 m ³	
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados	Processo SimaPro	Quantidade	Correlação	Origem
Água tratada	<i>Tap water {RoW} market for</i>	82.233,60 m ³	0,587 ton/m ³	Calculado (Tabela 4.12)
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	34.543,60 kWh	0,246 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.9)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Hipoclorito de sódio	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state</i>	11.212,80 kg	0,08 kg/m ³	Estimado (Tabela 4.3)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	354.823,80 kWh	2,532 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.14)
Transporte do lodo para o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4</i>	106.262,17 t.km	0,758 kg.km/m ³	Calculado (Tabela 4.6)
Emissões para a água	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Demanda Química de Oxigênio	<i>COD, Chemical Oxygen Demand</i>	4.634,11 kg	0,033 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.13)
Sólidos em Suspensão	<i>Suspended solids, unspecified</i>	1.737,79 kg	0,012 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.13)
Nitrogênio Amoniacal	<i>Ammonia, as N</i>	1.953,10 kg	0,014 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.13)
Fósforo Total	<i>Phosphorus, total</i>	579,26 kg	0,004 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.13)
Cloro residual	<i>Chlorine</i>	28,96 kg	0,0002 kg/m ³	Estimado (Tabela 4.13)

APÊNDICE G – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 6 de operação da ETE

Saída conhecida para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos		Total em 20 anos (m ³)	Unidade funcional	
Efluente tratado		140.160	1 m ³	
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Hipoclorito de sódio	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {GLO} market for</i>	33.638,40 kg	0,240 kg/m ³	Silva (2018) (Tabela 4.15)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	92.987,40 kWh	0,663 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.16)
Transporte do lodo para o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4</i>	106.262,17 kg.km	0,758 kg.km/m ³	Calculado (Tabela 4.6)
Emissões para o ar	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Metano (CH ₄)	<i>Methane, biogenic</i>	14.339,50 kgCH ₄	0,102 kgCH ₄ /m ³	Calculado (Tabela 4.17)
Emissões para a água	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Demanda Química de Oxigênio	<i>COD, Chemical Oxygen Demand</i>	29.172,90 kg	0,208 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.18)
Sólidos em Suspensão	<i>Suspended solids, unspecified</i>	4.912,61 kg	0,035 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.18)
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	<i>Nitrogen, total</i>	17.623,72 kg	0,126 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.18)
Fósforo Total	<i>Phosphorus, total</i>	1.505,32 kg	0,011 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.18)
Cloro residual	<i>Chlorine</i>	1.289,47 kg	0,009 kg/m ³	Silva (2018) (Tabela 4.18)

APÊNDICE H – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 7 de operação da ETE

Saída conhecida para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos		Total em 20 anos (m ³)	Unidade funcional	
Efluente tratado		140.160	1 m ³	
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados	Processo SimaPro	Quantidade	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	56.414,40 kWh	0,403 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.19)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Hipoclorito de sódio	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {GLO} market for</i>	33.638,40 kg	0,240 kg/m ³	Silva (2018) (Tabela 4.15)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>	36.573,00 kWh	0,261 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.20)
Transporte do lodo para o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4</i>	106.262,17 kg.km	0,758 kg.km/m ³	Calculado (Tabela 4.6)
Emissões para a água	Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Demanda Química de Oxigênio	<i>COD, Chemical Oxygen Demand</i>	29.172,90 kg	0,208 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.18)
Sólidos em Suspensão	<i>Suspended solids, unspecified</i>	4.912,61 kg	0,035 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.18)
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	<i>Nitrogen, total</i>	17.623,72 kg	0,126 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.18)
Fósforo Total	<i>Phosphorus, total</i>	1.505,32 kg	0,011 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.18)
Cloro residual	<i>Chlorine</i>	1.289,47 kg	0,009 kg/m ³	Silva (2018) (Tabela 4.18)

APÊNDICE I – Inventário de ciclo de vida correspondente ao cenário 8 de operação da ETE

Saída conhecida para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos		Total em 20 anos (m ³)	Unidade funcional		
Efluente tratado		140.160	1 m ³		
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados		Processo SimaPro	Quantidade	Correlação	Origem
Água tratada	<i>Tap water {RoW} market for Electricity, low voltage {BR}</i>		140.160 ton	1 ton/m ³	Calculado
Eletricidade	<i>electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>		56.414,40 kWh	0,403 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.19)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)		Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Hipoclorito de sódio	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {GLO} market for</i>		33.638,40 kg	0,240 kg/m ³	Silva (2018) (Tabela 4.15)
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)		Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Eletricidade	<i>Electricity, low voltage {BR} electricity voltage transformation from medium to low voltage</i>		36.573,00 kWh	0,261 kWh/m ³	Calculado (Tabela 4.20)
Transporte do lodo para o aterro	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4</i>		106.262,17 kg.km	0,758 kg.km/m ³	Calculado (Tabela 4.6)
Emissões para o solo		Processo SimaPro	Total em 20 anos	Correlação	Origem
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	<i>Nitrogen, total</i>		17.623,72 kg	0,126 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.18)
Fósforo Total	<i>Phosphorus, total</i>		1.505,32 kg	0,011 kg/m ³	Análises físico-químicas (Tabela 4.18)
Cloro residual	<i>Chlorine</i>		1.289,47 kg	0,009 kg/m ³	Silva (2018) (Tabela 4.18)

UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA
CEP: 40.210-630
Telefone: (71) 3283-9800
E-mail: pei@ufba.br
Home page: <http://www.pei.ufba.br>

