

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

Desirê Armborst Alves

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV DE UM SISTEMA DE
WETLAND CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL PARA O
TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO**

Santa Maria, RS
2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

Desirê Armborst Alves

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV DE UM SISTEMA DE
WETLAND CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL PARA O
TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO**

PPGEAMB/UFSM, RS

ALVES, Desirê Armborst

Mestre 2016

Santa Maria, RS
2016

Desirê Armborst Alves

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - ACV DE UM SISTEMA DE *WETLAND*
CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL PARA O TRATAMENTO DE ESGOTO
DOMÉSTICO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Delmira Beatriz Wolff

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Armborst Alves, Desirê
Avaliação do Ciclo de Vida - ACV de um sistema de wetland construído para o tratamento de esgoto doméstico / Desirê Armborst Alves.- 2016.
82 p.; 30 cm

Orientadora: Delmira Beatriz Wolff
Coorientador: Elvis Carissimi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, RS, 2016

1. Análise de Ciclo de Vida 2. Filtros plantados com macrófitas 3. SimaPro8 I. Beatriz Wolff, Delmira II. Carissimi, Elvis III. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Desirê Armborst Alves. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte. E-mail: desire.armborst@hotmail.com

Desirê Armborst Alves

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - ACV DE UM SISTEMA DE WETLAND
CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL PARA O TRATAMENTO DE ESGOTO
DOMÉSTICO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Aprovado em 22 de setembro de 2016:

Delmira Beatriz Wolff, Dr.^a (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Elvis Carissimi, Dr. (UFSM)
(Co-orientador)

Énio Leandro Machado, Dr. (UNISC)

Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS.
2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me guiar pelo melhor caminho sempre;

À minha família, em especial à minha mãe Zarita, que sempre me apoiou e incentivou durante toda esta caminhada;

Ao Allan Richard Frantz, pelo total apoio e incentivo;

À minha orientadora, Delmira Beatriz Wolff, pela oportunidade de trilhar este caminho junto a um grupo de pesquisa tão importante, pelos ensinamentos e pela amizade;

Aos colegas Ronaldo Kanopf de Araújo e Samara Terezinha Decezaro, pelo empenho na construção e operação no sistema experimental e por toda a ajuda, ensinamentos e amizade;

À bolsista de Iniciação Científica, Taise Perondi, pelo auxílio, amizade e companheirismo durante a pesquisa;

Às companheiras de apartamento, Nathana Swarowski e Gilneia Mello, pela amizade, parceria, paciência e cumplicidade;

À amiga Nájila Rocha, que eu reencontrei depois de alguns anos e que me ajudou muito nessa caminhada;

Às amigas de sempre: Soluane, Morgana, Betina, Éboni e Tatiane, por estarem sempre ao meu lado, há mais de 10 anos;

À ACV Brasil, pela autorização do uso do *software* Simapro 8[®]. Sem a licença este trabalho não seria possível;

À Doutora Katia Gutierrez, pelo auxílio prestado no momento de maior dificuldade;

Ao Professor Ênio Leandro Machado, da UNISC, por todo o auxílio prestado;

Ao Professor Elvis Carissimi pela co-orientação e auxílio sempre que precisei;

À PROINFRA, setores de elétrica, hidráulica, paisagismo e construção civil, pelo apoio na construção e manutenção do sistema experimental;

À FINEP pelo financiamento da pesquisa;

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida;

A todos os amigos e demais pessoas que contribuíram de alguma forma para o sucesso desta caminhada.

*Quando a última árvore for cortada,
quando o último rio for poluído,
quando o último peixe for pescado,
aí sim eles verão que dinheiro não se
come...*

(Provérbio Indígena)

RESUMO

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - ACV DE UM SISTEMA DE WETLAND CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL PARA O TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

AUTORA: DESIRÊ ARMBORST ALVES
ORIENTADORA: DELMIRA BEATRIZ WOLFF

O sistema de tratamento de esgoto por *wetland* construído leva em consideração os princípios básicos dos *wetlands* naturais para a modificação da qualidade da água, porém, contam com o fluxo hidráulico controlado e são construídos de acordo com a eficiência desejada de tratamento. Na Universidade Federal de Santa Maria foi instalado um *wetland* construído de fluxo vertical, projetado para tratar 1.500 litros por dia de esgoto doméstico, equivalente ao gerado por 10 habitantes da Casa do Estudante Universitário II, na cidade de Santa Maria – RS. Como toda atividade modificadora do meio ambiente, a construção e a operação do *wetland* construído resultam em impactos ambientais, que podem ser positivos ou negativos. Para avaliação destes impactos realizou-se a Análise do Ciclo de Vida – ACV do sistema de tratamento de esgoto. Considerada uma das ferramentas mais completas de avaliação de impactos ambientais, a ACV objetiva o estudo detalhado das possíveis emissões geradas por um processo ou produto. A ACV do *wetland* construído da UFSM foi realizada através do levantamento de dados de todos os materiais de construção utilizados na obra e dos parâmetros do tratamento do esgoto, e seguiu as etapas definidas pelas NBR ISO 14.040 e 14.044. Para avaliação dos impactos fez-se uso da biblioteca de dados Ecoinvent, do *software* SimaPro 8[®]. A interpretação dos resultados da fase construtiva foi realizada por meio do método ReCiPe, e da fase de operação através do método CML. Ainda foi realizada a análise da energia consumida na fabricação de todos os materiais de construção, através do método Demanda Acumulada de Energia. Os resultados mostraram que os tijolos de cerâmica, o aço e o cimento foram os materiais mais impactantes em todas as categorias analisadas, sendo o PVC, a cal e a areia os materiais menos impactantes. Os tijolos e o cimento representam 42,7% e 29,5%, respectivamente, dos impactos na categoria mudanças climáticas. O metano e o óxido nítrico gerados durante o tratamento de esgoto são os responsáveis pela ocorrência do impacto ambiental mudanças climáticas, causado 95% pelo metano e 5% pelo óxido nítrico. A DQO, o NTK e o PT causam a categoria de impacto eutrofização, representando 8,8%, 26,53% e 64,63% dos impactos, respectivamente. O metano está relacionado à formação de oxidantes fotoquímicos. A energia consumida na operação durante a vida útil do sistema causa impactos em todas as categorias ambientais analisadas através do *software*, sendo mínimos estes impactos, levando em conta o baixo consumo de energia do sistema.

Palavras-chave: Análise de Ciclo de Vida. Filtros plantados com macrófitas. Simapro 8.

ABSTRACT

LIFE CYCLE ASSESSMENT – LCA OF A VERTICAL FLOW CONSTRUCTED *WETLAND* FOR WASTEWATER TREATMENT

AUTHOR: DESIRÊ ARMBORST ALVES

ADVISOR: DELMIRA BEATRIZ WOLFF

The wastewater treatment system by constructed wetland takes into account the basic principles of natural wetlands for modification of water quality, however, it has controlled hydraulic flow and is constructed according to the desired treatment efficiency. At the Federal University of Santa Maria a vertical flow constructed wetland was designed to treat 1500 liters of wastewater per day, equivalent to that generated by 10 inhabitants of the House of College Student II, in the city of Santa Maria - RS. As every environment-modifying activity, the construction and operation of the constructed wetland result in environmental impacts, which may be positive or negative. To assess these impacts a Life Cycle Analysis - LCA was held on the wastewater treatment system. Considered one of the most complete tools for assessing environmental impacts, the LCA aims a detailed study of possible emissions from a process or product. The LCA of UFSM's constructed wetland was performed using the survey data of all building materials used in the work and the wastewater treatment parameters, and followed the steps defined by the ISO 14040 and 14044 (ABNT, 2009). For impact assessment, Ecoinvent data library and SimaPro 8[®] software were used. The interpretation of the results of the constructive phase was performed by ReCiPe method and the operation phase by CML method. Besides, analysis of the energy consumed in the manufacture of all construction materials was performed by Cumulative Energy Demand. The results showed that the bricks, steel and concrete were the most striking materials in all categories examined, with PVC, lime and sand the less striking materials. The bricks and cement represent 42.7% and 29.5%, respectively, of the impact of climate change category. Methane and nitrous oxide generated during the wastewater treatment are responsible for the occurrence of the environmental impact of climate change, cause by the 95% and 5% methane by nitrous oxide. COD, TKN and TP cause eutrophication representing 8.8%, 26.53% and 64.63% of impacts, respectively. Methane is related to the formation of photochemical oxidants. The energy consumed in operation during the life cycle of the system has an impact in all environmental categories analyzed by the software, with minimum impacts, taking into account the system's low power consumption.

Keywords: Life Cycle Analysis. Filters planted with macrophytes. SimaPro 8.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um <i>wetland</i> natural, com as zonas de transição entre os ambientes aquáticos e terrestres.....	20
Figura 2 - Esquema do filtro de fluxo horizontal. 1) afluente; 2) macrófitas; 3) impermeabilização; 4) zona de entrada; 5) tubulação de alimentação; 6) material filtrante; 7) sentido do fluxo; 8) zona de saída; 9) tubulação de coleta; 10) controlador de nível.....	23
Figura 3 - Esquema do filtro de fluxo vertical. 1) afluente; 2) macrófitas; 3) material filtrante; 4) tubulação de alimentação; 5) sentido do fluxo; 6) tubulação de coleta; 7) impermeabilização; 8) controlador de nível; 9) efluente final.	25
Figura 4 – Esquema simplificado de ACV, com demonstrativos de entradas, saídas e limite do sistema.....	30
Figura 5 - Esquema geral, com as entradas, saídas e limites de sistemas considerados na ACV de uma ETE.....	31
Figura 6 - Fases da ACV, definidas pela NBR 14.040 (2009)	33
Figura 7- Fases da AICV, com os elementos obrigatórios e opcionais ao estudo.....	37
Figura 8 - Exemplificação de causa-efeito	38
Figura 9 - Esquematização dos elementos obrigatórios da ACV	39
Figura 10 - Croqui de localização da ETE.....	46
Figura 11 - Etapas do tratamento de efluentes da ETE na Casa do Estudante da UFSM	47
Figura 12 – Filtro vertical, medindo 3,5 x 7,0 x 1,15 m.....	48
Figura 13 - Definição do escopo do estudo de ACV, com os limites do sistema, as entradas e saídas consideradas no estudo.....	49
Figura 14 - Normalização da fase de construção com as categorias de impacto mais relevantes, com uso do método ReCiPe	65
Figura 15 – Caracterização da fase construtiva com as categorias de impacto mais relevantes, com uso do método ReCiPe	66
Figura 16 – Pontuação única da Demanda acumulada de energia dos materiais de construção.....	68
Figura 17 – Caracterização da Demanda Acumulada de Energia dos materiais de construção.....	69
Figura 18 – Comparativo das 4 situações construtivas. Situação 1 (ETE real); Situação 2 (<i>wetland</i> escavado); Situação 3 (<i>wetland</i> construído + TS); Situação 4 (TS + <i>wetland</i> escavado).....	70
Figura 19 – Caracterização da operação do sistema com as categorias de impacto mais relevantes, com uso do método CML.	71
Figura 20 – Normalização energia x esgoto tratado, com uso do método ReCiPe. Mudanças Climáticas (MC); Acidificação Terrestre (AT); Eutrofização de água doce (EAD); Eutrofização Marinha (EM); Toxicidade Humana (TH); Formação de material particulado (FMP); Ecotoxicidade terrestre (ETT); Ecotoxicidade de água doce (ETAD); Ecotoxicidade Marinha (ETM); Radiação ionizante (RI); Esgotamento de metais (Esm); Esgotamento fóssil (EsF).	73
Figura 21 – Caracterização energia x esgoto tratado.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais de construção, aplicabilidade e método de obtenção da quantidade total.....	51
Tabela 2 – Quantidade e pesos das peças de PVC utilizadas na construção do sistema.....	52
Tabela 3 - Quantidade e massa total de tijolos e volume de argamassa utilizados na obra.....	53
Tabela 4 – Valores totais de água, cimento, cal e areia utilizados na composição da argamassa.....	54
Tabela 5 – Dosagem de concreto.....	55
Tabela 6 – ICV Situação 2.....	56
Tabela 7 – ICV Situação 3.....	56
Tabela 8 – ICV Situação 4.....	56
Tabela 9 – Métodos analíticos para levantamento dos dados da fase operacional.....	57
Tabela 10 – Inventário do Ciclo de Vida da Fase de Construção do sistema.....	61
Tabela 11 – ICV Situação 2.....	62
Tabela 12 - ICV Situação 3.....	62
Tabela 13 – ICV Situação 4.....	63
Tabela 14– Entradas e saídas da fase operacional.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Trabalhos sobre Impactos Ambientais de ETEs	42
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
AICV	Análise do Impacto do Ciclo de Vida
APHA	Associação Americana de Saúde Pública
AT	Acidificação Terrestre
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EAD	Eutrofização de água doce
EM	Eutrofização marinha
ETAD	Ecotoxicidade de água doce
ETE	Estação de Tratamento de Efluente
ETM	Ecotoxicidade marinha
ETT	Ecotoxicidade terrestre
EsF	Esgotamento fóssil
EsM	Esgotamento de metais
FBP	Filtro Biológico Percolador
FMP	Formação de material particulado
FPM	Filtro Plantado com Macrófitas
Hz	hertz
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
Kg	Quilograma
kWh	Quilowatt hora
LAC	Lodo Ativado Convencional
m ²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
mg/m ³	Miligramas por metro cúbico
MJ	Milijoules
MC	Mudanças climáticas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
N – NH ₃	Amônia
N – NO ₂	Nitrogênio Nitrito
N – NO ₃	Nitrogênio Nitrato
N ₂ O	Óxido Nitroso
NTK	Nitrogênio total kjeldahl
OD	Oxigênio Dissolvido
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PT	Fósforo Total
PO ₄ ³⁻	Fosfato
RENTED	Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados
RI	Radiação ionizante
SAC	Sistema de alagado construído
SDT	Sólidos dissolvidos totais

SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SST	Sólidos suspensos totais
ST	Sólidos totais
TH	Toxicidade humana
TS	Tanque séptico
UASB	Digestor anaeróbio de fluxo ascendente
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
USEPA	United States Environmental Protect Agency
V	Volts
WCFV	Wetland construído de fluxo vertical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE ESGOTOS	19
3.2	WETLANDS NATURAIS E WETLANDS CONSTRUÍDOS	19
3.2.1	Sistemas de escoamento subsuperficial – Filtros plantados com macrófitas	22
3.2.1.1	<i>Filtros de fluxo horizontal</i>	23
3.2.1.2	<i>Filtros de fluxo vertical</i>	24
3.2.1.3	<i>Sistemas híbridos</i>	25
3.3	ELEMENTOS PRESENTES NOS WETLANDS CONSTRUÍDOS.....	26
3.3.1	Material filtrante	26
3.3.2	Micro-organismos	27
3.3.3	Macrófitas	28
3.4	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS (AIA).....	29
3.5	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	29
3.5.1	Fases da ACV	32
3.5.1.1	<i>Objetivo e Escopo</i>	33
3.5.1.2	<i>Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)</i>	35
3.5.1.3	<i>Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)</i>	36
3.5.1.4	<i>Interpretação do Ciclo de Vida</i>	41
3.6	Avaliação de Impactos Ambientais de sistemas de tratamento de efluentes – Estado da arte	41
4	METODOLOGIA	46
4.1	IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	46
4.2	DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA	47
4.3	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO WETLAND CONSTRUÍDO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA – UFSM.....	49
4.3.1	Definição do objetivo e do escopo	49
4.3.2	Inventário de Ciclo de Vida	50
4.3.2.1	<i>Fase de construção</i>	50
4.3.2.2	<i>Cenários alternativos à construção do sistema</i>	55
4.3.2.3	<i>Fase de operação</i>	57
4.3.3	Avaliação de Impactos	59
4.3.4	Interpretação dos resultados	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV	61
5.1.1	Construção	61
5.1.2	Alternativas à construção do sistema	62
5.1.3	Operação	63
5.2	AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS	64
5.2.1	Construção	64
5.2.1.1	<i>Normalização</i>	64
5.2.1.2	<i>Caracterização</i>	65
5.2.1.3	<i>Demanda acumulada de energia</i>	67
5.2.2	Cenários alternativos à construção do sistema	70

5.2.3	Operação.....	71
5.2.3.1	<i>Caracterização</i>	71
5.2.3.2	<i>Energia para funcionamento do sistema.....</i>	72
6	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB (2013), no ano de 2010 apenas 39,7% do esgoto gerado no Brasil era tratado adequadamente, sendo 50,7% tratado precariamente e 9,6% não recebendo tratamento algum. No ano de 2013, conforme o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, o índice de coleta de esgotos nas cidades do Rio Grande do Sul variava de 20,1 a 40%.

Philippi et al. (2007) afirmam que esta carência de saneamento no Brasil promove um panorama preocupante pois efluentes sem tratamento ou com tratamento inadequado são lançados em corpos d'água receptores, podendo comprometer a saúde humana e causar sérios desequilíbrios ambientais.

Diante disso é necessário que se busquem alternativas para sanar problemas relacionados à falta de tratamento de esgoto sanitário. Dentro deste contexto, podem-se citar sistemas de tratamento de esgoto mais baratos e de fácil manutenção, como o caso dos *wetlands* construídos.

Zhi e Ji (2012) asseguram que os *wetlands* construídos vem se expandindo em diversas partes do mundo, independente do grau de desenvolvimento do país e explica que são sistemas que apresentam como vantagem a possibilidade de reuso do efluente tratado e aproveitamento da biomassa. No caso do Brasil, as vantagens estendem-se à disponibilidade de área territorial da maioria das regiões e às condições climáticas favoráveis a este tipo de tratamento.

O processo de implantação e operação de um sistema de *wetland* construído, assim como outros processos, ocasiona impactos ambientais, que podem ser positivos ou negativos, podendo ser um ponto a ser questionado e estudado. Um sistema de *wetland* construído foi implantado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), junto ao campus de Camobi, visando tratar os efluentes domésticos de um dos prédios da casa do estudante.

Sabendo-se que a instalação e operação de uma Estação de Tratamento de esgotos (ETE) geram aspectos e impactos ambientais, torna-se necessário identificá-los e buscar alternativas de mitigação. No processo de escolha por uma tecnologia de tratamento de efluentes, cabe analisar a alternativa que será mais eficiente na remoção de poluentes visando o alcance de parâmetros estipulados na resolução CONAMA 430/2011 e em legislações estaduais. Com o aumento da preocupação

ambiental, esta busca por uma alternativa de tratamento vem acompanhada pelo interesse em uma tecnologia social, ambiental e economicamente mais viável.

Para que a escolha pela melhor alternativa seja apropriada, existem as metodologias de Avaliação de Impactos Ambientais, que auxiliam na tomada de decisões pelos gestores das empresas e instituições, mostrando os impactos ambientais prováveis do sistema, bem como os impactos sociais e econômicos.

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou realizar um levantamento dos possíveis impactos ambientais decorrentes da operação do sistema de *wetland* construído em questão utilizando a ferramenta Análise de Ciclo de Vida. Para isso fez-se uso do *software* de Análise de Ciclo de Vida Simapro 8.1.1[®].

Este trabalho está inserido no projeto Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados (RENTED). Esta rede foi formada por meio da Chamada pública MCT/MCIDADES/FINEP/Ação Transversal – Saneamento Ambiental e Habitação – 06/10. Dentro da Rede, na UFSM, já foi desenvolvida e defendida a Dissertação de Mestrado “Nitrificação e remoção de matéria orgânica e carbonácea e sólidos de efluente doméstico em *wetland* construído de fluxo vertical”, de Decezaro (2016).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar e quantificar os impactos ambientais provenientes da construção e operação de um sistema de *wetland* construído de fluxo vertical para o tratamento de esgoto doméstico por meio da Análise do Ciclo de Vida (ACV), com abordagem portão – portão (*gate-to-gate*).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

- Elaborar o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) da construção e operação do sistema de tratamento de efluente estudado;
- Definir as categorias de impacto mais relevantes da construção e operação da ETE para a Análise do Ciclo de Vida;
- Identificar os principais fatores causadores dos impactos ambientais por meio da interpretação dos resultados encontrados com o *software* SimaPro 8[®], levando em conta as emissões para o solo, para a água e para o ar;
- Criar cenários alternativos à construção do sistema, objetivando verificar alternativas construtivas menos impactantes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE ESGOTOS

Tchobanoglous e Crites (1998) definem a gestão descentralizada de esgotos como a coleta, o tratamento e a destinação final ou o reuso dos esgotos provenientes de residências, bairros, comunidades isoladas, industriais ou instituições. Nestes sistemas, o tratamento de esgoto ocorre próximo ao local onde foi gerado, não necessitando de um sistema centralizado com uma extensa rede de coleta.

Wilderer e Schreff (2000) apontam como as três grandes vantagens do sistema descentralizado de esgoto: (a) a redução do transporte dos esgotos, que implica na possível eliminação de elevatórias e reservatórios de estocagem; (b) a opção da reutilização dos efluentes e (c) problemas em unidades simples não causam colapso em todo o sistema.

Dentro do contexto de tratamento descentralizado de esgotos, englobam-se tecnologias como os *wetlands* construídos, que visam tratar o esgoto gerado em escolas, pequenos aglomerados de residências, indústrias, dentre outros. Sendo utilizados pela primeira vez na Alemanha na década de 1950 (KADLEC e WALLACE, 2009), estes sistemas foram sendo difundidos em países como a Alemanha, França, Reino Unido, dentre outros. No Brasil, as pesquisas tiveram início com Salati e Rodrigues, sendo desenvolvidas novas tecnologias desde então (SALATI JR., SALATI, SALATI, 1999).

3.2 WETLANDS NATURAIS E WETLANDS CONSTRUÍDOS

Os *wetlands* naturais são tidos como uma zona de transição entre a zona terrestre e aquática. Kadlec e Knight (1996) definem que, nos *wetlands* naturais, os processos físicos, químicos e biológicos de tratamento ocorrem quando há a interação entre o efluente, o solo, as plantas e os micro-organismos.

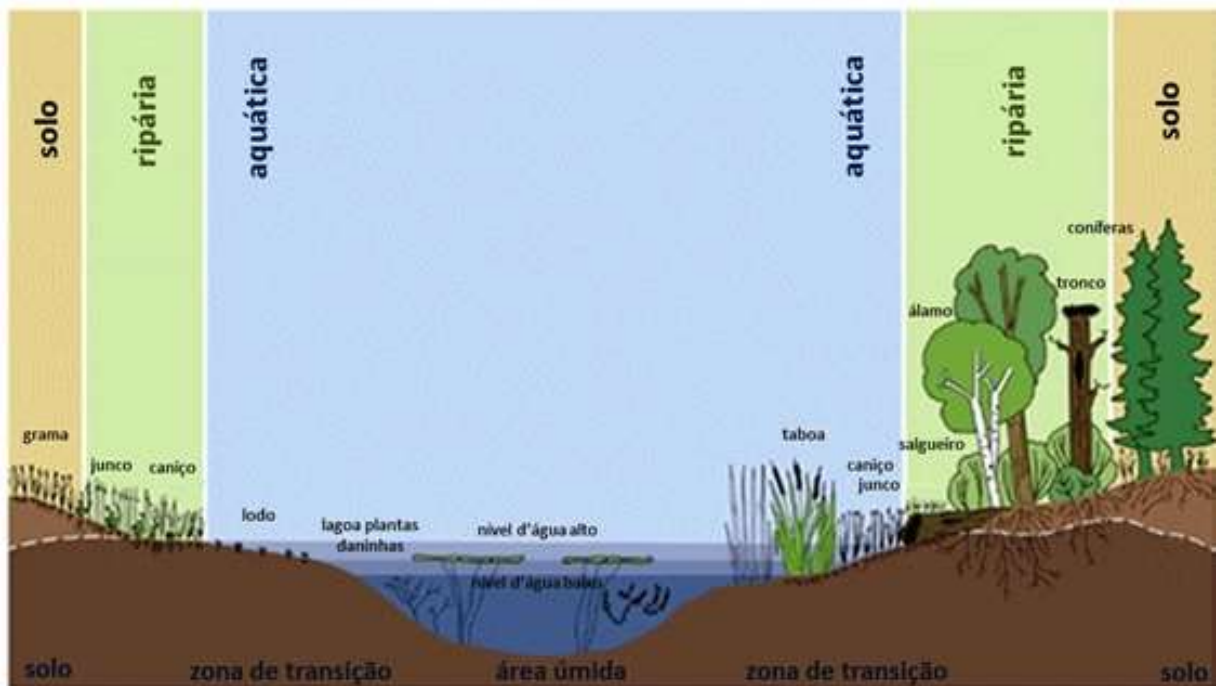
Segundo Olijnyk (2008), os *wetlands* são recursos naturais importantes que devem ser preservados para o equilíbrio do meio ambiente, uma vez que possuem a capacidade de realizar uma ciclagem de nutrientes.

Conforme a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2004), os *wetlands* naturais apresentam benefícios tanto para os seres humanos

quanto para os animais, uma vez que uma de suas funções mais importantes é a filtragem da água. Conforme a água atravessa a zona úmida de transição entre os ambientes aquático e terrestre, diminuem-se os sólidos em suspensão, que acabam se fixando à vegetação. Os outros poluentes passam a formas solúveis menos absorvidas pelas plantas ou tornam-se inativos. As plantas presentes criam condições propícias para o aparecimento de micro-organismos, que também são responsáveis pela transformação e remoção dos poluentes presentes na água.

A figura 1 mostra um sistema de *wetland* natural.

Figura 1 – Representação de um *wetland* natural, com as zonas de transição entre os ambientes aquáticos e terrestres.



Fonte: Araújo (2013)

Vymazal (2010) explica que os *wetlands* construídos utilizam, em um ambiente controlado, os processos naturais que ocorrem na vegetação de zonas úmidas. Desta forma, os *wetlands* construídos levam em conta as características dos *wetlands* naturais, porém são construídos de acordo com a necessidade de tratamento e a eficiência desejada.

Verhoeven e Meuleman (1999) dizem que os sistemas de *wetlands* construídos são utilizados para a purificação da água, em diferentes partes do mundo, desde

meados do ano de 1950 e citam os elevados custos da construção de sistemas centralizados de esgotos como um estímulo ao início das investigações sobre os *wetlands* construídos.

Sani et al. (2013) explicam que estes sistemas são utilizados para o controle da poluição ambiental, podendo ser utilizados para tratar diversos tipos de águas residuais, incluindo efluentes industriais, domésticos e agrícolas.

No Brasil, a primeira tentativa de usar o sistema de *wetlands* construídos foi feita por Salati e Rodrigues, em 1982. A tentativa baseou-se na construção de um lago artificial nas proximidades de um córrego poluído (Rio Piracicamirim), localizado em Piracicaba, São Paulo. A partir de então, novas tecnologias foram desenvolvidas, procurando-se aumentar a eficiência do sistema e diminuir os investimentos (SALATI JR, JALATI, SALATI, 1999).

Costa (2004) diz que mesmo se tratando de sistemas simples, os *wetlands* requerem um pré-tratamento do efluente, que pode ser um simples gradeamento ou uma sedimentação primária. Dependendo da exigência de tratamento, um processo terciário pode ser requerido.

Nas últimas décadas, a utilização de *wetlands* construídos como sistema de tratamento de águas residuais tem se intensificado (ZHI e JI, 2012). Philippi et al. (2007) citam as diversas nomenclaturas utilizadas, no Brasil, para os sistemas de *wetlands* construídos. Na literatura internacional estes sistemas são conhecidos como *constructed wetlands* e, em português, são reconhecidos pelos termos zona de raízes, filtros plantados com macrófitas, alagados naturais, terras úmidas construídas, leitos cultivados ou mesmo pelo termo em inglês *wetland*.

Os *wetlands* construídos tem como objetivo principal a melhoria da qualidade da água, seguido por objetivos secundários como a produção fotossintética, produção de energia, harmonia paisagística, dentre outros (KADLEC e KNIGHT, 1996, SALATI, SALATI, SALATI, 2009).

As técnicas possíveis para o uso destes sistemas variam de acordo com as características do efluente a ser tratado, do interesse paisagístico e da utilização da biomassa, da eficiência de tratamento desejada e da remoção de nutrientes, contaminante e outros poluentes (SALATI, SALATI, SALATI, 2009).

Dentre as vantagens dos *wetlands*, pode-se citar seu aspecto paisagístico e a ausência de odores, muitas vezes presentes em sistemas de tratamento convencionais (USEPA, 2004).

De acordo com a eficiência de tratamento desejada, os filtros podem ser construídos de duas formas distintas, segundo Verhoeven e Meuleman (1999): a) Sistemas de lâmina livre ou de escoamento superficial e; b) Sistemas de escoamento subsuperficial.

Neste trabalho é dado ênfase aos sistemas de escoamento subsuperficial, por ser o tipo de sistema estudado na pesquisa e também pelos sistemas de escoamento superficial já não serem mais tão utilizados.

3.2.1 Sistemas de escoamento subsuperficial – Filtros plantados com macrófitas

Este sistema dispõe de um material de recheio, por exemplo, brita, areia ou cascalho, onde o efluente a ser tratado é disposto. Desta forma, o efluente percola pelo material filtrante, onde as macrófitas, do tipo emergente, são plantadas diretamente (PHILIPPI e SEZERINO, 2004).

Philippi e Sezerino (2004) explicam que a depuração da matéria orgânica, a transformação da série nitrogenada e a retenção do fósforo são realizadas através de processos físicos (filtração e sedimentação), químicos (adsorção, complexação e troca iônica), e biológicos (degradação microbológica aeróbia e anaeróbia, predação e retirada de nutrientes pelas macrófitas). Estes processos ocorrem tanto no material filtrante como na rizosfera (região de contato entre as raízes e o solo/material de recheio).

Contando com escoamento do efluente entre o material filtrante, os sistemas de escoamento subsuperficial podem ser classificados de três formas, de acordo com o seu fluxo hidráulico:

- 1) Filtros de fluxo horizontal;
- 2) Filtros de fluxo vertical;
- 3) Sistemas Híbridos.

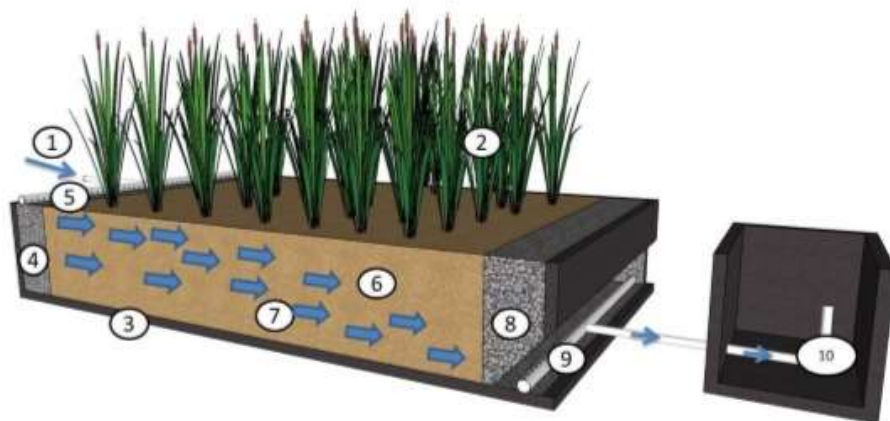
A seguir, apresenta-se uma revisão teórica quanto aos três tipos de classificação dos filtros plantados com macrófitas (FPM).

3.2.1.1 Filtros de fluxo horizontal

Os filtros de fluxo subsuperficial horizontal (Figura 2) contam com um leito composto por pedras, cascalho, areia ou solo, que dá suporte ao crescimento das plantas. O nível da lâmina de água encontra-se abaixo da superfície do material filtrante, sendo a altura do meio filtrante em torno de 0,5 a 0,6 m e da água entre 0,4 e 0,5 m. Para que não ocorram problemas com colmatação, o leito deverá contar com material filtrante de granulometria que permita o fluxo contínuo do esgoto (MOTA e VON SPERLING, 2009).

Estes sistemas são impermeabilizados para impedir a contaminação do lençol freático. A alimentação é realizada através de tubulações dispostas na zona de entrada, o efluente percola horizontalmente pelo material filtrante, através de uma superfície de declividade aproximada de 1% e chega à zona de saída, onde é coletado por uma tubulação (Figura 2).

Figura 2 - Esquema do filtro de fluxo horizontal. 1) afluente; 2) macrófitas; 3) impermeabilização; 4) zona de entrada; 5) tubulação de alimentação; 6) material filtrante; 7) sentido do fluxo; 8) zona de saída; 9) tubulação de coleta; 10) controlador de nível.



Fonte: Pelissari (2013).

Segundo Mota e Von Sperling (2009), nestes sistemas, a maior parte da zona subsuperficial é anaeróbia, apresentando zonas aeróbias adjacentes aos rizomas e raízes. Desta forma, o potencial de geração de maus odores e o surgimento de mosquitos e ratos é muito baixo.

De acordo com Vymazal (2010), o princípio básico do sistema de fluxo horizontal é a formação de um biofilme aderido a um meio suporte e raízes das plantas, onde os micro-organismos aeróbios e anaeróbios depuram a matéria orgânica e promovem a transformação da série nitrogenada. As macrófitas e a difusão atmosférica são responsáveis pelo fornecimento do oxigênio necessário.

Segundo Cooper (1999) o sistema é satisfatório para a remoção de bactérias e sólidos suspensos; bem como remove demanda bioquímica de oxigênio (DBO) até uma determinada capacidade de transferência de oxigênio e desnitrificação. No tratamento secundário, a nitrificação é pobre, devido à limitação na capacidade de transferência de oxigênio, sendo a nitrificação bem realizada quando este sistema é utilizado como tratamento terciário.

Silva (2007) afirma que este sistema é bastante utilizado para tratamento secundário e terciário, tanto na Europa quanto nos Estados Unidos.

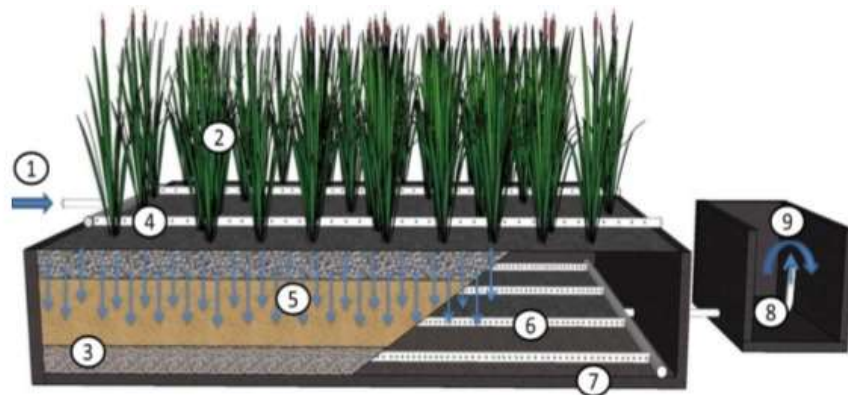
3.2.1.2 *Filtros de fluxo vertical*

Cooper, Humphries e Pound (1996) explicam que os filtros de fluxo vertical são escavados ou construídos no solo, impermeabilizados e possuem material filtrante (brita e areia na maioria das vezes). São utilizadas macrófitas do tipo emergente plantadas diretamente no material filtrante.

Estes sistemas são alimentados por tubulações instaladas na parte superior do filtro, o esgoto a ser tratado percola verticalmente pelo material filtrante e é coletado por tubulações instaladas ao fundo do filtro (Figura 3).

O filtro é mantido em condições aeróbias devido à intermitência na aplicação das cargas e o período de descanso. Esta alternância entre aplicação de carga e período de descanso é de suma importância no controle do crescimento da biomassa no meio filtrante (meio suporte e raízes) uma vez que permite condições aeróbias no interior do filtro (SILVA, 2007).

Figura 3 - Esquema do filtro de fluxo vertical. 1) afluente; 2) macrófitas; 3) material filtrante; 4) tubulação de alimentação; 5) sentido do fluxo; 6) tubulação de coleta; 7) impermeabilização; 8) controlador de nível; 9) efluente final.



Fonte: Pelissari (2013).

Silva (2007) cita como vantagens deste sistema:

- Área superficial requerida menor que o sistema de fluxo horizontal;
- Alta capacidade de nitrificação no tratamento secundário, devido à alta capacidade de transferência de oxigênio;
- Satisfatória remoção de DBO e DQO;
- Possível remoção de bactérias;
- Remoção de mais de 85% de nutrientes (nitrogênio), no tratamento secundário.

Decezaro (2016) realizou um levantamento das eficiências de remoção de DQO e $N-NH_4^+$ em *wetlands* construídos de fluxo vertical e verificou a remoção média de DQO superior a 70% na maioria das vezes, chegando a 99% em alguns casos. Quanto à remoção de $N-NH_4^+$, relata eficiências superiores a 80%.

Porém, como desvantagens do sistema, pode-se citar a baixa capacidade de remoção de sólidos suspensos e a possível obstrução do sistema caso não seja correta a escolha do meio suporte (SILVA, 2007).

3.2.1.3 Sistemas híbridos

Também conhecidos como sistemas combinados, os sistemas híbridos são uma associação em série dos filtros de fluxo vertical e dos filtros de fluxo horizontal. Neste sistema, as vantagens e desvantagens dos dois são combinadas,

complementando cada um deles individualmente. Desta forma, tem-se um efluente com baixa concentração de DBO, completamente nitrificado e parcialmente desnitrificado (SEZERINO, 2006; VYMAZAL, 2010; VYMAZAL, 2013).

Segundo Sezerino (2006), nesta associação, há o interesse de alcançar uma boa nitrificação nos filtros de fluxo vertical, que são bem oxigenados; e uma desnitrificação nos filtros de fluxo horizontal, onde encontram-se condições anóxicas necessárias para que ocorra esta reação.

3.3 ELEMENTOS PRESENTES NOS *WETLANDS* CONSTRUÍDOS

Os elementos atuantes nos filtros plantados com macrófitas são o material filtrante, os micro-organismos e as macrófitas.

3.3.1 Material filtrante

Olijnyk (2008) explica que o material filtrante está diretamente relacionado à filtração, adsorção e degradação microbiológica. Diante disso, é de suma importância o conhecimento das características dos materiais filtrantes a serem utilizados nos filtros.

Sezerino (2006) e Pelissari (2013) dizem que busca-se um material filtrante que seja capaz de, ao longo do tempo, manter boas condições de fluxo (condutividade hidráulica), aliado a um potencial reativo, capaz de promover adsorção de compostos inorgânicos presentes nas águas residuárias, como o íon amônio (NH_4^+) e ortofosfato (PO_4^{3+}).

Há estudos quanto ao uso de materiais filtrantes alternativos nos *wetlands* construídos, como bambu (ZANELLA, 2008), cascas de arroz (PHILIPPI et al., 2010) e pneu picado (COLLAÇO, 2001).

Pelissari (2013) diz que há uma desvantagem na utilização de materiais alternativos uma vez que são utilizados materiais de características desconhecidas, sendo difícil afirmar se os mesmos são adequados para o uso em sistemas de filtração.

O principal fator que influencia no processo de colmatção (entupimento) é a utilização de um material com granulometria e condutividade hidráulica impróprias,

sendo que a má escolha do material filtrante poderá acarretar na redução da infiltração do efluente (PELISSARI, 2013).

Outro fator que pode causar a colmatação do sistema é a aplicação de alta carga de efluente a ser tratado ou a alimentação contínua.

Zhao, Zhu e Tong (2009) citam alguns métodos que ajudam a evitar a colmatação do filtro, aumentando assim a vida útil do sistema. Dentre estes métodos, cita-se a aplicação apropriada de carga orgânica e de sólidos, evitando-se o crescimento excessivo do biofilme; a adoção de um tratamento físico-químico primário para a remoção dos sólidos e; uma operação intercalando períodos de alimentação e de repouso.

Teiter e Mander (2005) citam que o aumento da lâmina d'água nos sistemas de fluxo horizontal não influencia significativamente na eficiência do tratamento, porém pode aumentar a emissão de CH₄. Assim, é de grande importância evitar a colmatação do filtro, uma vez que a colmatação pode influenciar sobre as emissões gasosas do mesmo. Diante disso, a definição do material de recheio é crucial para o bom funcionamento do sistema, minimizando ainda os impactos ambientais causados pelo sistema.

Winter e Goetz (2003) dizem que muitos estudos estão sendo conduzidos no sentido de conhecer melhor os fatores que induzem à colmatação, bem como prever ações corretivas para prolongar a vida útil do sistema.

3.3.2 Micro-organismos

As bactérias são as mais representativas dentro dos diversos grupos de micro-organismos que habitam os filtros plantados, e são as responsáveis pelos processos de decomposição da matéria orgânica, nitrificação e desnitrificação. (OLIJNYK, 2008)

Olijnyk (2008, p. 38) observa que os micro-organismos encontrados nos filtros plantados estão presentes no esgoto e aderidos ao meio suporte do material filtrante e nas raízes das plantas, formando assim o biofilme.

Von Sperling (1996) explica que nos sistemas aeróbios o oxigênio é consumido à medida que vai penetrando no biofilme, até atingir condições anóxicas ou anaeróbias.

Nas regiões aeróbias do filtro, ocorre a oxidação do nitrogênio amoniacal a nitrito e, em seguida em nitrato, fenômeno conhecido como nitrificação convencional.

Já a desnitrificação ocorre na camada anóxica, enquanto a formação de ácidos orgânicos e redução de sulfatos ocorrem nas regiões anaeróbias. Desta forma, cada proporção do biofilme tem papel importante na depuração do efluente (VON SPERLING, 1996).

3.3.3 Macrófitas

Philippi et al. (2007) explicam que as macrófitas são as plantas utilizadas nos sistemas de *wetlands*, e Brix (1997) atribui às macrófitas as seguintes ações:

- estabilização da superfície do filtro;
- proporcionar boas condições para o processo físico de filtração;
- aeração da rizosfera;
- retirada de nutrientes devido ao requerimento nutricional das plantas;
- harmonia paisagística.

Segundo Tanner (1996), os requisitos para que as plantas se adaptem ao sistema de tratamento de efluentes em *wetlands* construídos são:

- Aceitabilidade ecológica da planta, ou seja, que esta não apresente riscos à integridade ecológica dos ecossistemas;
- Adaptação da planta às condições climáticas locais, às pragas e às doenças;
- Tolerância aos poluentes;
- Rápida propagação e adaptação e;
- Alta capacidade de remoção de poluentes, seja através da assimilação direta e armazenamento, ou pelo aumento de transformações microbianas como a nitrificação e desnitrificação.

Conforme Olijnyk (2008), as macrófitas podem ser:

- Emersas ou emergentes: são enraizadas, porém ficam com as folhas para fora d'água;
- Flutuantes: são enraizadas e as folhas ficam flutuando na superfície da água;
- Submersas: são enraizadas e crescem totalmente submersas na água.

As macrófitas são seres fotoautotróficos, ou seja, fazem uso da energia solar para assimilar o carbono inorgânico presente na atmosfera e produzir matéria orgânica que será fonte de energia para os seres heterotróficos (animais, bactérias e fungos) (BRIX, 1997).

A tolerância da planta a ambientes saturados de água (ou esgoto), o potencial de crescimento e a presença das plantas nas áreas onde se pretende instalar o sistema, são características que devem ser levadas em conta na escolha da macrófita que será utilizada no sistema. Desta forma, as plantas estarão adaptadas às condições climáticas locais.

3.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS (AIA)

As atividades realizadas pelo homem podem vir a causar impactos de várias esferas, podendo estes ser positivos ou negativos. A Resolução CONAMA nº 01 de 1986, em seu Artigo 1º, conceitua impacto ambiental como “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetem”:

- I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II - as atividades sociais e econômicas;
- III - a biota;
- IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V - a qualidade dos recursos ambientais.

Hospido et al. (2004) asseveram que uma ETE dá origem a impactos ambientais devido ao seu consumo de energia, utilização de compostos químicos, emissões atmosféricas e referentes ao lodo gerado e aos pós-tratamentos necessários na maioria das ETES.

Diante da necessidade da realização da Avaliação de Impactos Ambientais de obras, processos industriais e produtos surgem as ferramentas de AIA, como, por exemplo, os Sistemas de Gestão Ambiental, os Inventários de Emissão de Gases de Efeito Estufa e a Avaliação do Ciclo de Vida. Por ser considerada a ferramenta mais completa da AIA e também a utilizada na pesquisa, a ACV é abordada com mais detalhes no próximo item.

3.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Uma das ferramentas utilizadas com o propósito de compreender e diminuir os impactos associados a produtos e processos é a Análise de Ciclo de Vida (ACV). Com

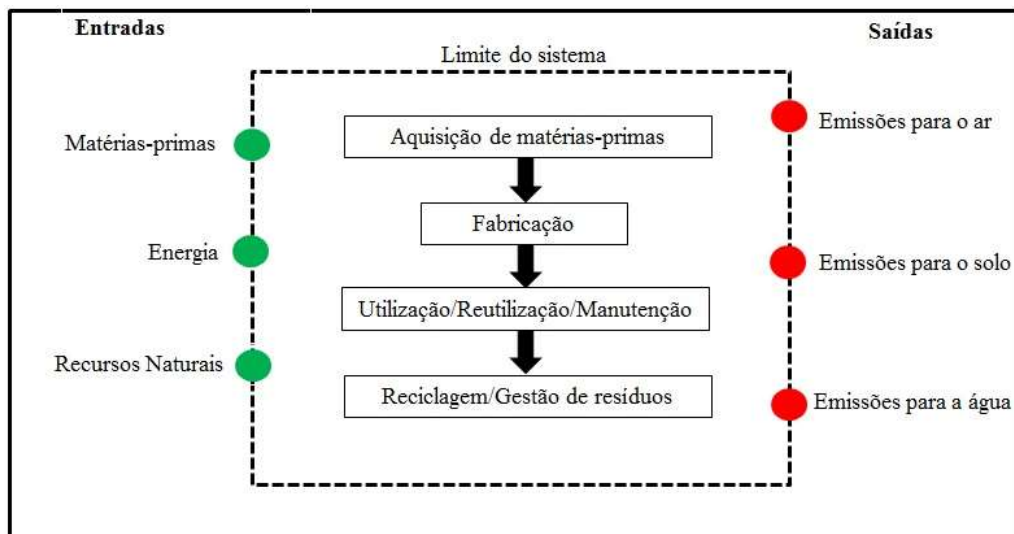
a crescente preocupação sobre a importância da proteção ambiental, esta ferramenta tem se tornado cada vez mais importante.

Sendo um instrumento de gestão ambiental previsto na série de normas NBR ISO 14000, conforme Godin, Bouchard e Vanrolleghem (2011) e Fuchs, Mihelcic e Gierke (2011) esta ferramenta permite a escolha de uma alternativa levando em consideração seus aspectos técnicos e desempenho ambiental, auxiliando ainda na identificação de oportunidades de melhorias no sistema em estudo.

A NBR 14.040 (ABNT, 2009) define que a ACV é uma técnica para avaliar aspectos ambientais e potenciais impactos ambientais associados a um produto. Chehebe (1998) explica que a ACV compreende etapas que vão desde a extração de matérias primas da natureza (berço) até a disposição final do produto (túmulo).

Na figura 4 pode-se verificar um esquema simplificado de ACV.

Figura 4 – Esquema simplificado de ACV, com demonstrativos de entradas, saídas e limite do sistema.

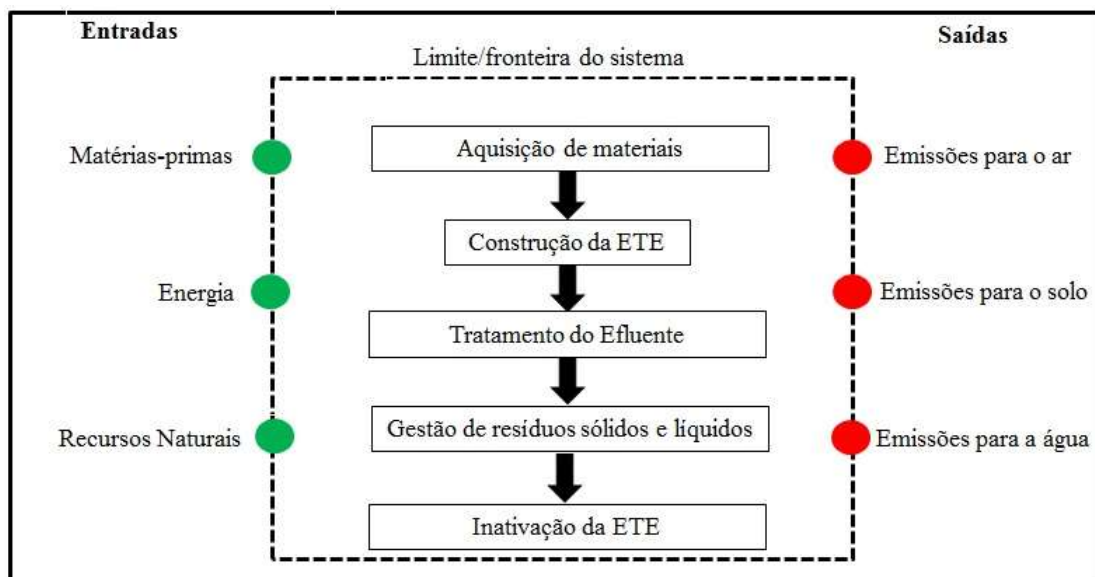


Fonte: Adaptado de Gutierrez, 2014.

Conforme pode ser observado na Figura 4, a ACV considera as entradas no sistema, que podem ser as matérias-primas utilizadas, a energia consumida e todos os recursos naturais necessários para a realização de algum processo, bem como a geração de subprodutos e as emissões que determinado processo pode vir a lançar no meio ambiente.

Adaptando a Figura 4 à realidade desta pesquisa, tem-se o esquema representado na Figura 5. A ACV representada na Figura 5 considera todos os processos, desde a obra para instalação da ETE, passando por sua operação e finalizando em sua desativação, considerando todo o processo da obra e do tratamento do efluente, bem como as emissões gasosas, e a geração de resíduos sólidos e líquidos e suas respectivas emissões para o ar, solo e água.

Figura 5 - Esquema geral, com as entradas, saídas e limites de sistemas considerados na ACV de uma ETE.



Diante da complexidade da realização de uma ACV completa, muitos estudos delimitam as fronteiras do processo a ser estudado. Para isso, faz-se uso de diferentes metodologias de ACV.

A ACV BRASIL (2015) cita três abordagens diferentes que podem ser adotadas na elaboração de uma Análise de Ciclo de Vida:

- *Cradle-to-grave* (do berço ao túmulo): Considera todo o ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o descarte final;

- *Cradle-to-gate* (do berço ao portão): Considera desde a extração de matérias-primas até a entrada na fábrica para beneficiamento;

- *Gate-to-gate* (do portão ao portão): Considera apenas a fase industrial do produto.

A NBR 14.040 (ABNT, 2009), descreve os princípios e a estrutura necessária para conduzir e relatar estudos de ACV, incluindo requisitos mínimos e define a ACV como uma técnica utilizada para avaliar os aspectos ambientais e potenciais associados a um produto mediante:

- análise de um inventário de entradas e saídas de um sistema;
- a avaliação dos impactos ambientais associados às entradas e saídas e;
- a interpretação dos resultados em relação aos objetivos dos estudos.

Esta ferramenta pode auxiliar, segundo a NBR ISO 14.040:

- Identificar oportunidades de melhorias nos aspectos ambientais dos produtos em diversos pontos de seu ciclo de vida;

- Tomada de decisões, seja nas indústrias, nas organizações governamentais e não governamentais;

- Na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental e;

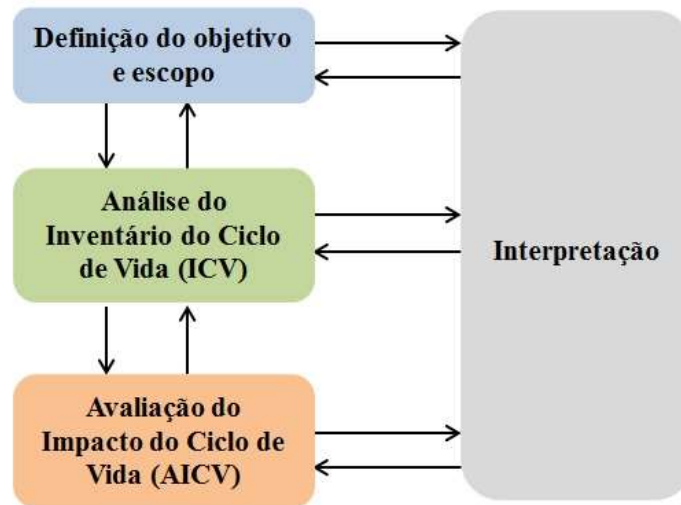
- No *marketing*, através de uma declaração ambiental, um programa de rotulagem ecológica ou uma declaração ambiental de produto.

Para realização de uma ACV se faz necessário o cumprimento de algumas etapas.

3.5.1 Fases da ACV

Para realização de um estudo de ACV, conta-se com quatro etapas distintas, consideradas de grande importância para o sucesso do estudo, conforme observado na Figura 6.

Figura 6 - Fases da ACV, definidas pela NBR 14.040 (2009)



Fonte: Adaptado de NBR 14.040 (ABNT, 2009).

As etapas da Figura 6 estão descritas no item seguinte.

3.5.1.1 Objetivo e Escopo

Segundo a NBR 14.040 (ABNT, 2009), o objetivo da ACV deve declarar, sem equívocos, a aplicação, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo para quem se pretende comunicar os resultados do estudo.

A fase de definição do escopo de um estudo deve considerar e descrever os seguintes itens, conforme a NBR 14.040 (ABNT, 2009), 14.044 (ABNT, 2009) e ACV Brasil (2015):

- **Função do sistema:** Finalidade para que determinado produto ou sistema exista. Adaptando-se à realidade da pesquisa, pode-se ter como função do sistema o tratamento de efluente doméstico.

- **Unidade funcional:** É a quantificação das funções identificadas para o estudo. Tem como intuito fornecer uma referência para relacionar as entradas e saídas. É necessária para a comparação de sistemas ou produtos. Por exemplo: Pintar 100m² de parede; embalar 100 litros de cerveja; tratar 1 m³ de esgoto.

- **Fluxo de referência:** Determinação da quantidade necessária para determinada atividade. Por exemplo, na comparação entre a toalha de papel e um

secador a ar para a secagem de mãos. Neste caso, o fluxo de referência será o papel consumido e a massa de ar quente necessária para secar o mesmo número de mãos.

- **Sistema de produto:** Conexão entre as unidades do processo, através de energia ou materiais (produtos, coprodutos e emissões). A NBR 14.040 (ABNT, 2009) diz que diversos estágios do ciclo de vida, processos elementares e fluxos devem ser levados em consideração, como: a aquisição de matérias-primas; entradas e saídas na cadeia principal de manufatura/processamento; a distribuição e o transporte; a produção e o uso de combustíveis, eletricidade e calor; utilização e manutenção de produtos; a disposição final dos resíduos dos processos e dos produtos; o reuso, reciclagem de produtos e a recuperação de energia; a manufatura de materiais auxiliares; dentre outros.

Nesta etapa define-se o tipo de abordagem que será realizada: “do berço ao túmulo”, “do berço ao portão”, ou “do portão ao portão”.

- **Alocação:** Trata-se da divisão de responsabilidades ambientais no caso de sistemas multifuncionais, ou seja, sistemas com múltiplas saídas (produtos e coprodutos). Neste caso, dividem-se os impactos entre as saídas. A divisão de impactos pode ser feita através de grandezas físicas (massa e energia) ou socioeconômicas (preço de mercado). Desta forma, a saída que apresentar maior percentual de massa, energia ou valor de mercado recebe maior percentual de impacto.

A NBR 14.040 diz que a alocação deve ser evitada pelo fato de que a sua escolha é um fator subjetivo, uma vez que a escolha dos pesos pode alterar significativamente as conclusões do estudo.

- **Tipos de impacto e metodologia de avaliação e interpretação:** Seleção da metodologia para a avaliação dos impactos ambientais e a forma de interpretação dos resultados. Segundo a NBR 14.044 (ABNT, 2009) a seleção das categorias de impacto, dos indicadores das categorias e os modelos de caracterização utilizados na metodologia deve ser consistente e seguir os procedimentos descritos nesta norma.

- **Requisitos da qualidade dos dados:** A NBR 14.044 (ABNT, 2009) define que os requisitos de qualidade dos dados devem ser especificados para que sejam atendidos o objetivo e o escopo do trabalho, e convém que abranjam:

❖ Cobertura temporal: idade dos dados e o período mínimo para a coleta dos dados;

- ❖ Cobertura geográfica: área geográfica de onde devem ser coletados os dados para alcance do objetivo e escopo;
 - ❖ Cobertura tecnológica: tecnologia utilizada;
 - ❖ Precisão: medida da variabilidade dos dados (por exemplo: variância);
 - ❖ Completeza: porcentagem dos fluxos medidos ou estimados;
 - ❖ Representatividade: avaliação qualitativa do grau em que os dados refletem a verdadeira população de interesse;
 - ❖ Consistência: avaliação qualitativa quanto à uniformidade da aplicação da metodologia aos diversos componentes da análise;
 - ❖ Reprodutibilidade: avaliação qualitativa que permite analisar se a metodologia e os valores dos dados permitem que outro executante encontre os resultados;
 - ❖ Fontes dos dados: Definição da origem dos dados utilizados. Estes podem ser primários (medição realizada pelo autor da pesquisa), secundários (dados encontrados por outros pesquisadores), de literatura, medidos, calculados, estimados ou de Inventários de Ciclo de Vida já existentes no *software* utilizado.
 - ❖ Incerteza da informação: dados, modelos e pressupostos.
- **Tipo de análise crítica:** Com a finalidade de impor transparência, compreensibilidade, atendimento aos objetivos e avaliar os dados utilizados, esta etapa tem como objetivo estabelecer como será e quem será responsável por uma revisão crítica do estudo. Etapa realizada apenas quando julgada necessária.
- **Tipo e formato de relatório:** Podendo ser empresarial ou público, o relatório final do estudo deverá conter linguagem de fácil acesso ao público em geral.
- É importante que o escopo seja bem definido para assegurar que o grau de detalhe do estudo seja compatível para o alcance do objetivo imposto.
- Esta fase poderá passar por alterações no decorrer do trabalho quando informações adicionais forem coletadas.

3.5.1.2 *Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)*

Para realização de um estudo de ACV, faz-se necessário o levantamento de dados referentes ao processo ou produto que está sendo analisado. O levantamento de dados referentes ao produto ou processo é definido como o Inventário de Ciclo de Vida.

Chehebe (1998) explica que a Análise do Inventário trata-se da fase de coleta e quantificação de todas as variáveis envolvidas no processo: matérias-primas, energia, transporte, emissões (para o ar, solo e água), efluentes líquidos e resíduos sólidos gerados, dentre outras.

Segundo ACV Brasil (2015) esta etapa compreende ainda os procedimentos de cálculos para quantificar as entradas e saídas do produto ou processo estudado.

Considerada a etapa mais demorada e complexa do estudo, nesta fase pode ocorrer a troca do objetivo do trabalho, devido às dificuldades encontradas para levantamento dos dados. Dependendo do objetivo do estudo, esta pode ser a última etapa da ACV.

3.5.1.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

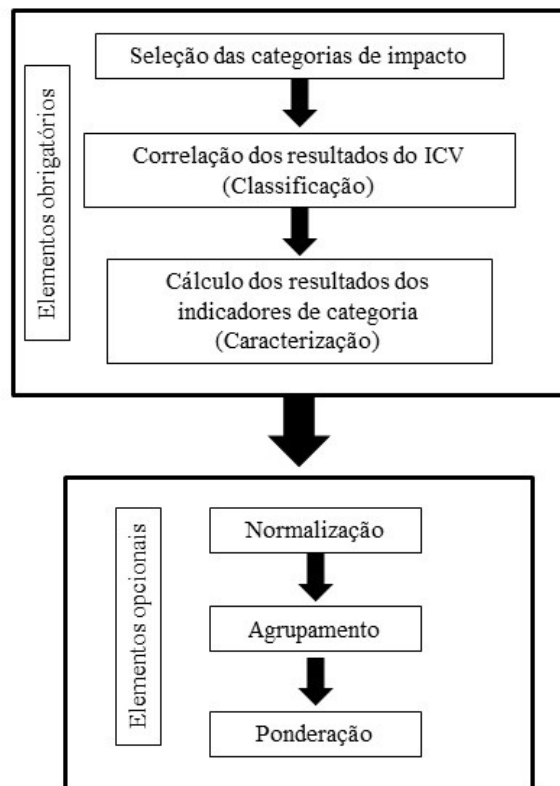
Sendo o Inventário de Ciclo de Vida uma etapa de difícil elaboração e interpretação, cabe uma etapa de avaliação do Inventário. Segundo Chehebe (1998), a AICV consiste na interpretação dos dados obtidos conforme o objetivo do estudo.

Chehebe (1998) diz que podem ser realizadas avaliações com base somente nos dados obtidos na fase de elaboração do ICV. Porém, quando são encontradas diferenças nos parâmetros de impacto ou quando se tiver a necessidade de relacionar as intervenções ambientais aos problemas ambientais, esta etapa de avaliação de impacto pode ser de grande valia.

A NBR 14.044 (ABNT, 2009) explica que o objetivo desta fase é avaliar os dados do ICV para uma melhor compreensão quanto à significância ambiental destes resultados, fazendo uso de indicadores de categorias. Estes, por sua vez, são utilizados para refletir quanto às emissões advindas do processo e representam os potenciais impactos do produto ou processo.

A fase de AICV consiste em elementos obrigatórios e opcionais (Figura 7), segundo a NBR 14.044 (ABNT, 2009).

Figura 7- Fases da AICV, com os elementos obrigatórios e opcionais ao estudo.



Fonte: Adaptado de NBR 14.040 (ABNT, 2009)

a) Elementos obrigatórios:

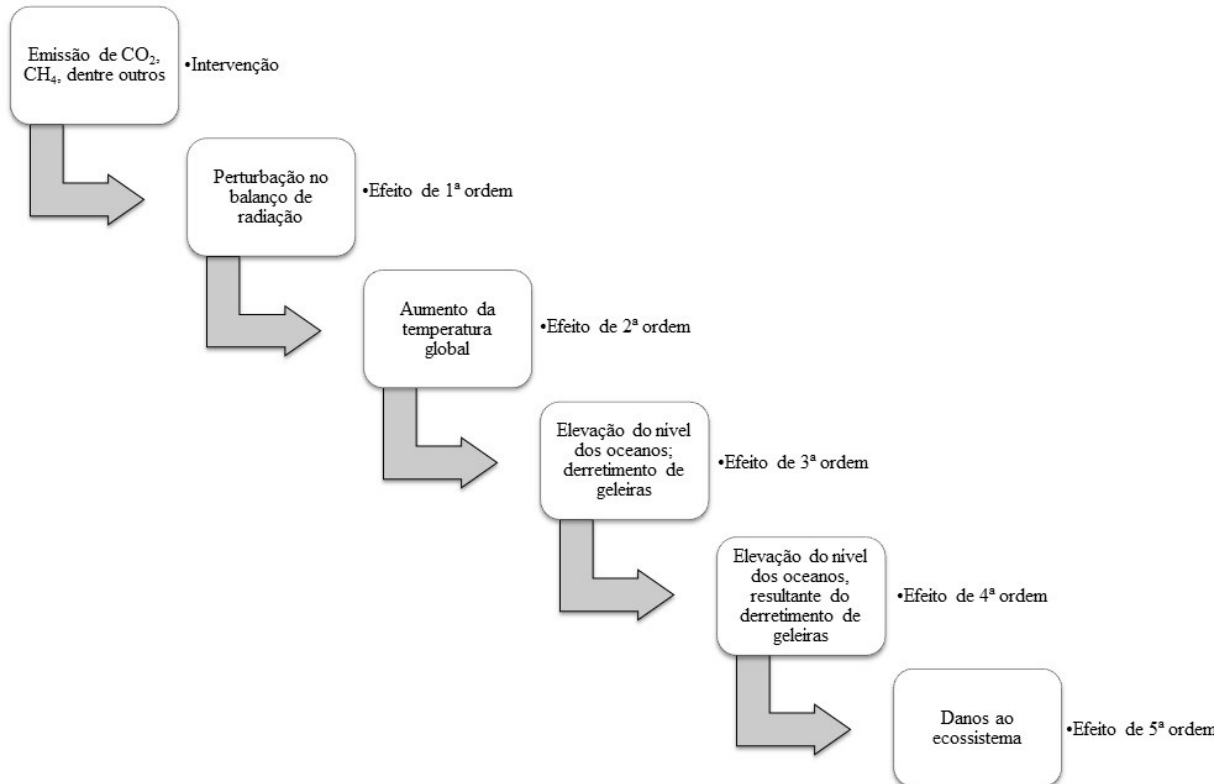
Para a realização da ACV, a etapa da AICV deve incluir os seguintes elementos obrigatórios:

- **Seleção das categorias de impacto:** Identificação dos pontos de preocupação ambiental, das categorias e dos indicadores que serão utilizados no estudo.

A ACV Brasil (2015) cita a divisão das categorias de impacto em impactos de ponto médio, que derivam do Inventário do Ciclo de Vida e indicam um potencial impacto futuro, antes da ocorrência de um dano; e impactos de ponto final, que derivam dos de ponto médio e causam danos à saúde humana e ao meio ambiente.

Para melhor compreensão, Chehebe (1998) exemplifica a cadeia de causa-efeito do efeito estufa da seguinte forma, vista na Figura 8.

Figura 8 - Exemplificação de causa-efeito



Fonte: Adaptado de Chehebe, 1998

Levando em consideração o exposto na Figura 8, seleciona-se, geralmente, como o ponto final de um impacto o efeito advindo do efeito de 1ª ou 2ª ordem, uma vez que quanto maior a ordem do efeito, mais difícil será sua modelagem e previsão. (CHEHEBE, 1998).

Segundo Gutierrez (2014) e Chehebe (1998), tem-se como exemplos de categorias de impacto:

Ponto médio:

- Mudanças Climáticas
- Depleção da Camada de Ozônio
- Acidificação terrestre
- Eutrofização de água doce
- Ecotoxicidade terrestre
- Ecotoxicidade de água doce

- Demanda acumulada de energia

Ponto final:

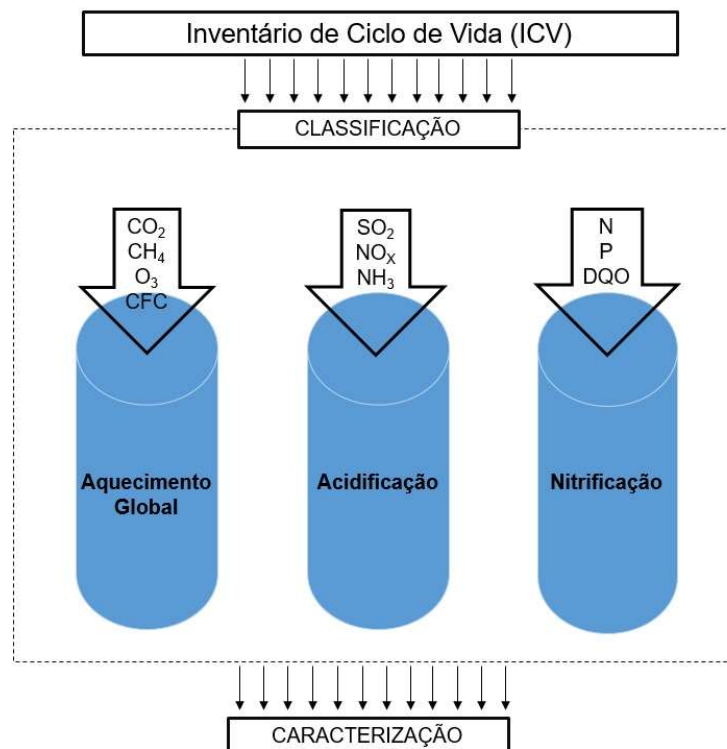
- Qualidade do Ecossistema
- Saúde Humana
- Uso de Recursos

- **Classificação:** Chehebe (1998) explica que a classificação tem como objetivo atribuir os dados do inventário às categorias de impacto. Por exemplo: Atribuir ao SO₂, NO_x e NH₃ à categoria de acidificação; e aos gases CO₂, CH₄, CO, N₂O e NO_x à categoria de aquecimento global.

- **Caracterização:** Chehebe (1998) define esta etapa como a quantificação de cada categoria de impacto para problemas ambientais. Por exemplo, quanto ao potencial de redução da camada de ozônio: Medida em relação ao efeito de 1 quilograma (kg) de CFC-11 equivalente por kg de gás emitido.

Na Figura 9 observa-se a esquematização dos elementos obrigatórios da ACV.

Figura 9 - Esquematização dos elementos obrigatórios da ACV



b) Elementos opcionais:

Como elementos opcionais, a NBR ISO 14.040 (ABNT, 2009) cita os seguintes elementos:

- **Normalização:** cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a informações de referência. Chehebe (1998) exemplifica esta etapa relacionando a poluição de uma determinada substância à poluição total em um ano.

- **Agrupamento:** A NBR ISO 14.044 (ABNT, 2009) define esta etapa com a união de categorias de impacto em um ou mais conjuntos.

- **Ponderação:** uma possível agregação dos resultados em casos muito específicos e somente quando significativos.

Brilhuis-Meijer (2014) explica que a ponderação é a etapa opcional mais debatida quanto à sua realização ou não. A autora explica que esta etapa implica na multiplicação dos valores normalizados de cada categoria de impacto por um fator de ponderação que expressa a importância relativa da categoria de impacto em análise. Este passo é controverso, uma vez que os fatores de ponderação escolhidos podem influenciar nos resultados e conclusões da ACV.

Para realização desta etapa da ACV, faz-se uso de diferentes métodos no SimaPro 8[®], de acordo com o objetivo e com os dados inventariados. Dentre os métodos, destaca-se aqui o ReCiPe e o CML, utilizados nesta pesquisa para a AICV da fase construtiva e operacional, respectivamente. Ambos foram escolhidos por apresentarem os resultados mais relevantes para os dados inventariados. Para escolha do método a ser utilizado, algumas simulações são realizadas no *software* com o intuito de verificar qual apresenta resultados com maior representatividade.

Em suma, Gutierrez (2014) conclui que esta etapa consiste na conversão dos resultados do ICV pelos elementos obrigatórios, em diferentes categorias de impacto, sendo os elementos opcionais úteis para a normalização, agrupamento ou para a atribuição de pesos dos resultados. Conforme a ISO 14.040, existe uma subjetividade nesta etapa da ACV, bem como a escolha, a modelagem e a avaliação das categorias de impacto.

3.5.1.4 *Interpretação do Ciclo de Vida*

A fase de interpretação do Ciclo de Vida trata-se da conclusão do trabalho. A partir dos resultados da análise do Inventário e da Avaliação de Impacto buscam-se conclusões e recomendações acerca do estudo. As quatro etapas da ACV são interdependentes, podendo-se retornar a qualquer uma delas em qualquer momento do estudo (GUTIERREZ, 2014).

3.6 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES – ESTADO DA ARTE

Diferentes metodologias de Avaliação de Impactos Ambientais já foram aplicadas em sistemas de tratamento de efluentes com o intuito de quantificar os impactos ambientais causados pela instalação e operação destes.

Para melhor entendimento da AIA de ETE, optou-se por fazer uma breve revisão de trabalhos já publicados, objetivando uma visão sistêmica acerca do assunto.

Hospido et al. (2004) relatam que são poucos os estudos de ACV realizados em ETE até aquele momento. Analisando os trabalhos realizados nesta área, percebe-se que parte destes estudos apenas adotam valores satisfatórios de remoção de poluentes dos efluentes, o que implica em várias limitações na interpretação da ACV.

No Quadro 1 pode ser vista uma relação de trabalhos realizados na área de Avaliação de Impactos Ambientais de ETE, levantando os principais dados estudados em cada pesquisa. Os trabalhos citados no Quadro 1 nortearam a elaboração da metodologia da presente pesquisa e foram utilizados para fins de comparação de resultados.

Quadro 1 - Trabalhos sobre Impactos Ambientais de ETES

(continua)

Autor	Metodologia, Resultados e Considerações
<p>1. Hospido et al. (2004) Espanha</p>	<p>Com uso do <i>software</i> SimaPro[®], versão 5.0, realizou-se a ACV de uma ETE projetada para o tratamento de efluente de 90.000 habitantes. Para a ACV, levou-se em consideração a geração de lodo, biogás e o lançamento do efluente líquido. Tendo em conta os limites do sistema, este foi dividido em cinco subsistemas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Subsistema 1: Entrada do efluente bruto, o pré-tratamento e o tratamento primário, o lançamento deste efluente tratado em corpo d'água e o transporte do efluente. - Subsistema 2: Tratamento secundário (lodos ativados) e a descarga do efluente tratado em corpo d'água. - Subsistema 3: Tratamento do lodo, desde a sua geração até o seu armazenamento em silos e a geração de gás. Este subsistema inclui ainda a produção e o transporte de compostos químicos consumidos no sistema de tratamento. - Subsistema 4: Consumo de energia dos serviços auxiliares e da iluminação da ETE. - Subsistema 5: Este subsistema inclui o descarte final do lodo, seu transporte e sua aplicação no solo como adubo, considerando ainda a eliminação do uso de fertilizantes. <p>As principais categorias de impacto encontradas foram a eutrofização, associada às cargas de NH₃, PO₄³⁻ e DQO do efluente, e a ecotoxicidade terrestre, associada à emissão de metais pesados do lodo, como o Cr, Hg e Zn, mesmo em casos em que estes permaneceram dentro dos parâmetros exigidos em legislação.</p>
<p>2. Standmark e Leonardson (2005) Suécia</p>	<p>Nesta pesquisa, os autores monitoraram a emissão de CH₄ e CO₂ de três <i>wetlands</i> construídos pelo período de um ano. As emissões de gases CH₄ e CO₂ foram medidas com a técnica da câmara estática instaladas nas partes centrais dos <i>wetlands</i>. A produção de CH₄ foi maior no período de maio a setembro, quando a temperatura era elevada e as concentrações de nitrato eram baixas. Sabe-se que a atividade dos micro-organismos é diretamente relacionada à temperatura e, porém, os autores surpreenderam-se com a grande inibição da emissão do metano nos meses mais frios. Em um dos <i>wetlands</i> a concentração de nitrato foi relacionada às taxas de emissão de CH₄. Os estudos mostraram que os <i>wetlands</i> construídos emitem os gases do efeito estufa. Diante disso, os autores dizem que estes sistemas devem ser construídos em locais adequados para a ocorrência da desnitrificação, ou seja, com altas concentrações de nitrato.</p>

(continuação)

<p>3. Teiter e Mander (2005) Estônia</p>	<p>Os autores monitoraram a emissão de N₂O, N₂, CH₄ e CO₂ por <i>wetlands</i> construídos verticais e horizontais e por matas ciliares por um período de dois anos, com o objetivo de comparar o potencial de aquecimento global entre os <i>wetlands</i> e as matas ciliares.</p> <p>Os sistemas comparados foram:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 01 <i>wetland</i> construído de fluxo subsuperficial horizontal para o tratamento de efluente hospitalar; - 01 sistema híbrido para tratamento de efluente doméstico composto por: 02 filtros de fluxo subsuperficial vertical e 02 filtros de fluxo superficial horizontal. - Mata ciliar às margens de um pequeno rio no sudeste da Estônia. <p>Para medição laboratorial dos gases, fez-se uso de dois métodos: o da câmara fechada e o do Hélio-Oxigênio.</p> <p>Encontrou-se uma emissão de N₂O e de CH₄ mais elevada nos <i>wetlands</i> do que nas matas ciliares, enquanto não houve diferença significativa na emissão de CO₂. A emissão de N₂ foi maior nos <i>wetlands</i> horizontais do que nos verticais, enquanto a emissão de N₂ pelas matas ciliares foi ainda menor do que a dos <i>wetlands</i>. Os sistemas de fluxo vertical apresentaram maior emissão de N₂O do que os de fluxo horizontal.</p>
<p>4. Machado et al. (2006) Portugal</p>	<p>Utilizando o SimaPro 7.0, os autores realizaram a ACV de três sistemas de tratamento de esgotos domésticos: <i>wetlands</i> construídos (01 vertical e 01 horizontal); sistema de infiltração lenta e; lodo ativado. Os autores utilizaram dados dos equipamentos e materiais da construção, operação e desativação das ETEs, considerando um período de vida útil do sistema de 20 anos. Encontraram como mais vantajosos os sistemas de <i>wetland</i> e de infiltração lenta, concluindo que isto deve-se ao fato de utilizar-se menor quantidade de materiais em suas construções, menor demanda de energia para seu funcionamento e pela absorção de CO₂ durante seus processos de tratamento. Estes sistemas auxiliam na redução da categoria de impacto “aquecimento global” devido às suas características de absorção de CO₂.</p>
<p>5. Hoibye et al. (2008) Dinamarca</p>	<p>Os autores compararam o tratamento de esgoto realizado por filtros de areia, ozonização e por biorreator de membrana, em termos de aspectos ambientais, econômicos e técnicos, através da ACV. Incluindo nos estudos os materiais de construção, a energia necessária para a operação de cada sistema, a disposição final do lodo gerado, as emissões, os metais pesados, desreguladores endócrinos e os detergentes presentes no efluente. Concluíram que os filtros de areia são tecnologias com impactos ambientais menos significativos devido ao baixo consumo de energia e elevada remoção de metais pesados.</p>

(continuação)

<p>6. Roux et al. (2010) França</p>	<p>Os autores realizaram a ACV para comparação dos impactos ambientais causados por efluente, com mesma DBO, em três casos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Wetland</i> construído de fluxo vertical; - Lodo ativado; - Lançamento de esgoto bruto em corpo receptor. <p>A categoria de impacto “eutrofização” mostrou-se mais afetada no sistema de <i>wetland</i> construído devido à remoção incompleta de N e P nestes sistemas. Nas demais categorias, os <i>wetlands</i> mostraram-se menos impactantes do que os sistemas de lodo ativado. Os autores concluíram ainda que a rede coletora de esgotos representa grande impacto em todas as categorias, exceto para a eutrofização.</p>
<p>7. Fuchs, Mihelcic e Gierke (2011) Estados Unidos</p>	<p>Utilizando o SimaPro[®], versão 7.0, os autores realizaram a análise das emissões de gases do efeito estufa (N₂O, CO₂ e CH₄) por sistemas de <i>wetlands</i> construídos de fluxo vertical e horizontal. O ciclo de vida realizado no trabalho considerou os materiais de construção, a obra, o tanque séptico e a operação do sistema de <i>wetland</i> e a permanência do filtro no local mesmo depois da sua inativação. O tempo de vida útil considerado foi de 50 anos e os valores de DBO, N e P utilizados foram estimados. Os autores realizaram análise nas diferentes categorias de impacto. Segundo os autores, as emissões gasosas compõem a maioria dos impactos ambientais causados por um <i>wetland</i> construído na categoria “mudanças climáticas”. O N₂O e outros óxidos são formados durante os processos de nitrificação e desnitrificação, sendo a otimização dos processos de transferência de oxigênio, nitrificação e desnitrificação capaz de diminuir as emissões destes gases, reduzindo os impactos referentes a estes. O autor chegou à conclusão de que o sistema de fluxo vertical conta com menores impactos ambientais do que o sistema de fluxo horizontal, uma vez que o vertical exige menor área para construção, gera menor emissão de gases do efeito estufa e apresenta melhor remoção de nitrogênio, o que influencia diretamente na minimização de algumas categorias de impacto. Os filtros de fluxo vertical contam ainda com a vantagem do baixo consumo de energia, bem como boa eficiência de nitrificação e desnitrificação.</p>
<p>8. Gutierrez (2014) Brasil</p>	<p>Comparação de seis sistemas de tratamento:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lagoa facultativa (7,5 g CH₄ /m³); - Lagoa anaeróbia + Facultativa (77,4 g CH₄ /m³); - Lagoa anaeróbia + Facultativa + Maturação (89,4 g CH₄ /m³); - UASB (2.061,48 g CH₄/m³) + Sistema de alagado construído vertical– SAC (29,1 g CH₄ /m³ e 0,29 g N₂O/m³); - UASB (2.061,48 g CH₄/m³) + Filtro Biológico Percolador – FBP (2,68 g CH₄ /m³ e 0,23 g N₂O/m³); - UASB (2.061,48 g CH₄/m³) + Lodo Ativado Convencional – LAC (1,20 x 10⁻² g N₂O/m³ e 17kWh/hab.ano ou 0,31 kWh/m³).

(conclusão)

	<p>Considerou-se a eficiência média de cada sistema para a estimativa das emissões líquidas. Quanto às emissões gasosas, considerou-se o valor descrito anteriormente para cada sistema, por m³ de esgoto tratado, seguindo bibliografias. Para emissões sólidas, considerou-se o lodo gerado nos sistemas UASB.</p> <p>Após elaboração de ICV, utilizou-se o <i>software</i> SimaPro[®] para realização da ACV.</p> <p>Como resultados, cita-se apenas o que a pesquisa encontrou quanto à emissão de CH₄ nos sistemas, uma vez que é um dos gases mais impactantes no ciclo de vida dos sistemas de <i>wetlands</i> construídos, conforme verificado também em outros trabalhos citados. Gutierrez (2014) encontrou uma emissão 22 vezes maior de CH₄ no sistema UASB + SAC do que o sistema de lagoa facultativa, porém, ressalta que a eficiência de tratamento de efluente é muito maior no sistema UASB + SAC do que no sistema de lagoa facultativa. Os valores totais, em g CH₄/m³ de esgoto tratado em cada sistema foram:</p> <ul style="list-style-type: none"> - UASB + SAC = 171 g CH₄/m³ - UASB + FBP = 145 g CH₄/m³ - UASB + LAC = 142 g CH₄/m³ - Lagoa anaeróbia + Facultativa = 77,4 g CH₄/m³ - Lagoa anaeróbia + Facultativa + Maturação = 12 g CH₄/m³ - Lagoa facultativa = 7,5 g CH₄/m³
9. Lopes (2014) Brasil	<p>Esta pesquisa consistiu em realizar a ACV de um sistema de tratamento de esgoto composto por um reator UASB seguido por 04 <i>wetlands</i> construídos de fluxo horizontal subsuperficial, com desinfecção por solução de hipoclorito de sódio, realizada em um tanque de contato. Utilizando o SimaPro[®], realizou-se levantamento das seguintes categorias de impacto: Depleção abiótica, aquecimento global, acidificação e eutrofização. A fase de operação do sistema apresentou maiores impactos ambientais do que a fase de construção. A eutrofização foi a categoria de maior impacto, seguida da depleção abiótica, devido à concentração de nutrientes lançadas no corpo receptor. A situação sem o uso da solução de hipoclorito apresentou menor impacto para a depleção abiótica e acidificação.</p>

Fonte: A autora

Conforme pode ser observado no Quadro 1, existem diversas metodologias para a Avaliação de Impactos Ambientais dos sistemas de tratamento de efluentes. Vale ressaltar que as pesquisas realizadas por Gutierrez (2014) e Lopes (2014) estão inseridas na Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizado.

4 METODOLOGIA

4.1 IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Avaliação de Impactos Ambientais desta pesquisa foi realizada no *wetland* de fluxo vertical da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), construído no campus de Camobi, Santa Maria, no Rio Grande do Sul. O sistema está em funcionamento desde setembro do ano de 2014.

Localizada a 293 km da capital Porto Alegre, a cidade de Santa Maria está situada na região central do Estado do Rio Grande do Sul. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população estimada de Santa Maria para o ano de 2014 era de 274.838 habitantes.

Segundo dados do *site* da Universidade, no ano de 2016, a UFSM conta com um total de 29.295 alunos matriculados em todos os campi, sendo 20.885 alunos estudando no Campus de Camobi.

A Estação de Tratamento de Efluente (ETE) em questão situa-se no campus da UFSM de Camobi, ao lado da Casa do Estudante, prédio 35, conforme visto na Figura 10.

Figura 10 - Croqui de localização da ETE



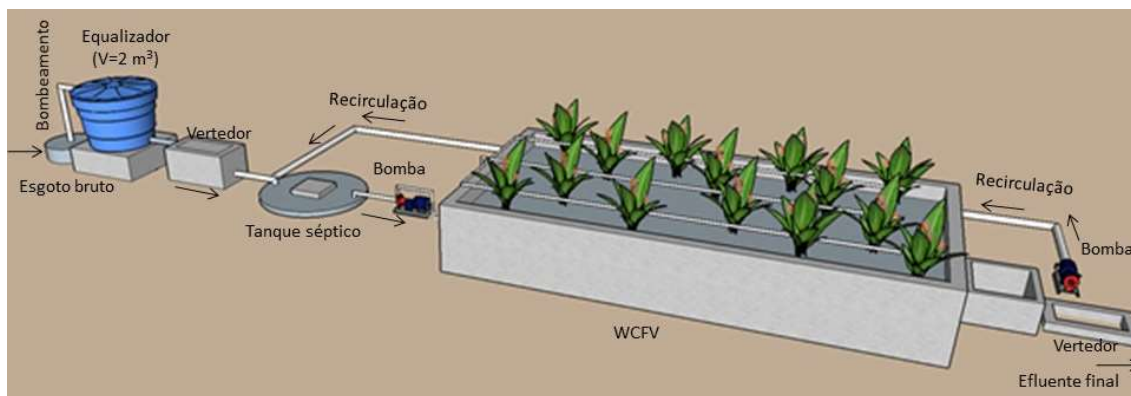
Fonte: Google Earth

A ETE trata o efluente gerado por 10 alunos residentes na Casa do Estudante, resultando em 1.500 litros por dia de efluente tratado.

4.2 DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O sistema de tratamento de efluente conta com as seguintes etapas de tratamento, verificadas na Figura 11.

Figura 11 - Etapas do tratamento de efluentes da ETE na Casa do Estudante da UFSM



Fonte: DECEZARO (2015)

- Tanque de equalização: Com a função de homogeneizar a vazão de efluente, o tanque equalizador tem capacidade para armazenar 2 mil litros de efluente.

- Vertedores: A medição de vazão do efluente da ETE é realizada com o uso de medidores ultrassônicos instalados em vertedores triangulares, tanto na entrada quanto na saída do sistema de tratamento.

- Tanque séptico: Tem a função de sedimentar os sólidos e realizar a desnitrificação do efluente. Vale ressaltar que, nesta pesquisa, a desnitrificação não foi considerada, uma vez que não havia sido iniciada durante as análises de efluente utilizadas.

- Bombeamento: Para o bombeamento do efluente do tanque séptico para o filtro, foi instalada uma bomba Kajima modelo QB 60, bivolt, 110V/220V, 60 Hz.

- *Wetland* de fluxo vertical: Medindo 7 metros de comprimento, 3,5 metros de largura e 1,15 metros de profundidade (Figura 12), o filtro conta com 0,70 metros de material de recheio, composto por uma camada de brita 2 ao fundo e outra à

superfície, e por uma camada de brita 1 entre as duas camadas. A macrófita utilizada é do tipo *Heliconia psittacorum*.

Figura 12 – Filtro vertical, medindo 3,5 x 7,0 x 1,15 m.



Fonte: A autora

O filtro tem a função de tratar o efluente através da absorção e adsorção promovida pelas macrófitas e pelo material filtrante. O filtro promove a nitrificação, sendo a desnitrificação promovida no tanque séptico, através da recirculação do efluente.

- Caixa de coleta: Trata-se da caixa de coleta do efluente tratado. Parte deste efluente é descartada, sendo uma parte recirculada.

- Recirculação: Tubulação de transporte do efluente final para o tanque séptico, para que ocorra a desnitrificação. Como citado anteriormente, a desnitrificação não foi considerada na fase de operação do sistema, porém, a tubulação de recirculação foi considerada na fase de construção.

O sistema é alimentado por oito pulsos diários de aproximadamente 187,5 litros de efluente em cada, totalizando os 1.500 litros de alimentação por dia.

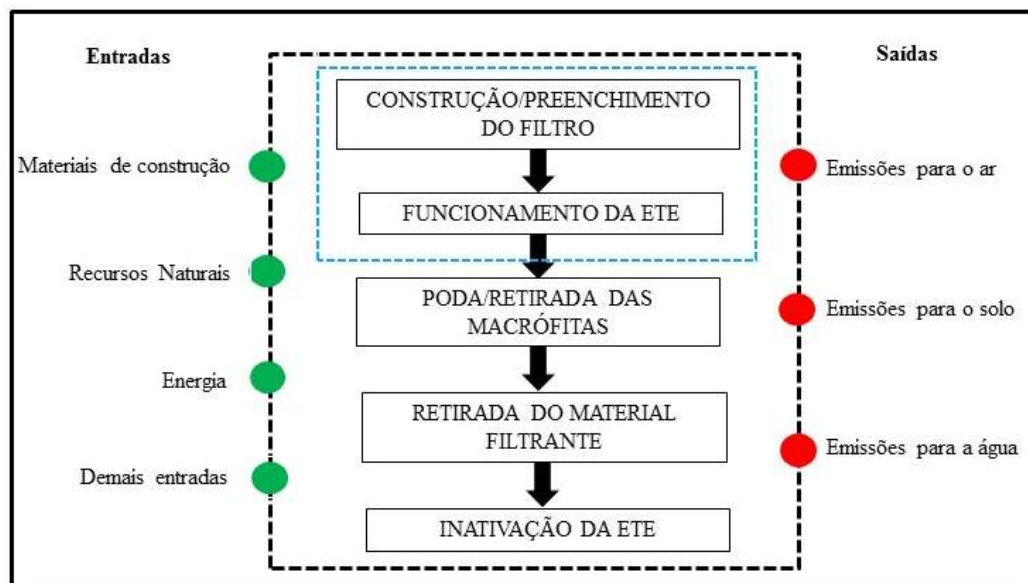
4.3 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO WETLAND CONSTRUÍDO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA – UFSM

4.3.1 Definição do objetivo e do escopo

O trabalho teve como objetivo avaliar os impactos ambientais da construção e operação do sistema de *wetland* construído de fluxo vertical para o tratamento de esgoto doméstico. O tempo de vida útil do sistema considerado no estudo foi de 20 anos.

Na Figura 13 tem-se o escopo simplificado do presente estudo.

Figura 13 - Definição do escopo do estudo de ACV, com os limites do sistema, as entradas e saídas consideradas no estudo.



Fonte: A autora

Para avaliar os impactos ambientais da construção do sistema, realizou-se um levantamento dos materiais de construção utilizados na obra, bem como a água consumida. Já para a fase operacional, considerou-se a energia total consumida em 20 anos, com base na potência das bombas, os parâmetros de entrada e saída de esgoto e os gases emitidos durante o tratamento.

Para atender todos os dados necessários para a ACV, seguiram-se os itens da NBR ISO 14.040 (ABNT, 2009):

- Unidade funcional: m³ de esgoto tratado
- Sistema de produto a ser analisado: Os sistemas considerados foram a construção do sistema e o tratamento do efluente.
- as fronteiras do sistema: O tipo de análise realizada é *cradle-to-gate* (do berço ao portão), uma vez que considera a construção da ETE, mas não o fim da vida útil do filtro, sendo que a retirada do material filtrante após este tempo não foi analisada.
- Requisitos de qualidade dos dados iniciais: Os dados referentes à fase de construção foram levantados analisando, diretamente na obra, todos os tipos de materiais utilizados. Alguns materiais, como pode ser observado no ICV da fase construtiva, foram medidos diretamente na ETE, outros foram encontrados através de cálculos levando em conta a área de cada construção. Os dados da fase operacional foram obtidos com análise laboratorial do esgoto e as emissões gasosas através de cálculos encontrados na literatura (ver no ICV).

4.3.2 Inventário de Ciclo de Vida

4.3.2.1 Fase de construção

Para a elaboração do ICV da fase de construção do sistema foram levantados os quantitativos dos materiais de construção considerados mais relevantes. Esta relevância foi devido à quantidade necessária, uma vez que materiais presentes em baixa quantidade não foram considerados, tais como os parafusos, pregos e fiação elétrica.

Na Tabela 1 pode-se verificar os materiais de construção considerados no estudo, a sua aplicabilidade na construção e o método de obtenção da quantidade total.

Tabela 1 – Materiais de construção, aplicabilidade e método de obtenção da quantidade total

Material	Aplicabilidade	Metodologia de quantificação
PVC	Tubulações do sistema	Toda a tubulação de esgoto foi medida diretamente na estação e todas as peças foram consideradas (joelhos, curvas, plugues, dentre outros).
Bloco cerâmico	Construção de toda estrutura de alvenaria.	A quantidade de tijolos foi calculada com base nas medidas de cada tijolo. Assim, considerando a junta de 1 cm de argamassa entre eles, fez-se o cálculo de tijolos utilizados por metro quadrado de construção.
Água	Lavagem das britas e composição da argamassa e do concreto.	Medição direta durante a fase de lavagem das britas e cálculo levando em conta a composição da argamassa e do concreto.
Areia Cimento Cal	Composição da argamassa	Cálculo com base no traço de argamassa utilizado. O traço utilizado foi o de 1:2:8, que significa 1 porção de cimento para cada 2 porções de cal e 8 porções de areia. Para o cálculo do volume total de argamassa foi calculada a área total de cada parede ou base de fundo e considerado 1 centímetro de juntas entre os tijolos.
Brita	Material de preenchimento do filtro e composição do concreto.	Foi considerado o volume total de brita utilizado para o preenchimento do filtro e a quantidade utilizada na fundação de todas as partes de alvenaria (concreto).
Fibra de vidro	Caixa d'água utilizada para equalização do esgoto.	Consulta do peso aproximado da caixa d'água de fibra de vidro com capacidade de armazenamento de 2.000 litros
Aço	Estrutura de fundo do filtro.	Quantidade conferida em nota fiscal de compra do material.

O PVC foi medido diretamente na ETE e então pesquisou-se o peso aproximado de cada peça, com o intuito de chegar ao valor total de PVC, em massa. Na tabela 2 encontram-se detalhadas cada peça de PVC encontrada na ETE.

Tabela 2 – Quantidade e pesos das peças de PVC utilizadas na construção do sistema

Peça	Quantidade (m)	Peso unitário (kg/m)	Peso total (kg)
Tubo PVC 32 mm	44,7	0,200	8,94
Tubo PVC 40 mm	20	0,240	4,8
Tubo PVC 50 mm	0,35	0,390	0,1365
Tubo PVC 60 mm	1,3	0,500	0,65
Tubo PVC 75 mm	0,50	0,610	0,305
Tubo PVC 100 mm	6,7	0,843	5,6481
Tubo PVC 120 mm	1,05	1,0	1,05
Massa total de tubos de PVC			21,52 kg
Curva PVC 90° 32 mm	8	0,079	0,632
Curva PVC 90° 60 mm	3	0,39	1,17
Joelho PVC 90° 32 mm	8	0,043	0,344
Joelho PVC 90° 50 mm	1	0,116	0,116
Joelho PVC 90° 100 mm	1	0,229	0,229
Joelho PVC 90° 120 mm	1	0,41	0,41
Bucha de redução 150 x 100 mm	1	0,292	0,292
Bucha de redução 100 x 50 mm	1	0,126	0,126
Bucha de redução 85 x 75 mm	1	0,126	0,126
Bucha de redução 75 x 60 mm	1	0,100	0,100
Bucha de redução 60 x 50 mm	2	0,047	0,094
Bucha de redução 50 x 40 mm	2	0,033	0,066
Bucha de redução 40 x 32 mm	3	0,017	0,051
CAP 32 mm	3	0,021	0,063
CAP 40 mm	3	0,021	0,063
CAP 85 mm	1	0,228	0,228
TÊ 40 mm	2	0,061	0,122
TÊ 60 mm	2	0,200	0,400
TÊ 32 mm	1	0,032	0,032
Luva 75 mm	1	0,058	0,058
Cruzeta 40 mm	1	-	-
Adaptador 60 mm	2	-	-
Válvula de retenção 60 mm	1	0,400	0,400
Registro de esfera 32 mm	3	0,228	0,684
Registro de esfera 60 mm	1	0,400	0,400
Luva de redução 40 x 32 mm	2	0,150	0,300
Massa total de peças de PVC			5,9372
MASSA TOTAL DE PVC			27,45 Kg

Pelo fato de que algumas peças não puderam ser medidas diretamente, por estarem instaladas em locais de difícil acesso, adotou-se o valor total de 30 kg de PVC, sendo 2,55 kg a mais do que o valor total mostrado na tabela.

O traço de argamassa utilizado foi o de 1:2:8, ou seja, considerou-se uma porção de cimento para cada duas de cal e oito de areia. Assim, calculou-se a quantidade total de argamassa levando-se em conta a área total das paredes de alvenaria, com uma junta de 1cm entre os tijolos e cuidou-se o tipo de tijolo (06 furos ou maciço) de cada estrutura construída da ETE.

Nas paredes construídas com tijolos 06 furos, foi estimado um total de 40 tijolos por metro quadrado, levando em conta as dimensões do tijolo de 9 x 14 x 24 cm e a junta de argamassa de 1 cm entre eles. Quando considerado o tijolo maciço de dimensões 10,5 x 5,5 x 21,5 cm o número total foi de 68 tijolos por metro quadrado. Para a massa total de tijolos, adotou-se 2,2 kg/tijolo 6 furos e 2,1 kg/tijolo maciço. Assim, chegou-se aos valores de tijolos e argamassa exibidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade e massa total de tijolos e volume de argamassa utilizados na obra

Construção	Área (m²)	Tipo e número de tijolos	Massa total de tijolos (kg)	Argamassa (m³)
Base da caixa d'água	20,8	832 tijolos 6 furos	1830,4	0,2375
Filtro	24,15	1642 tijolos maciços	3.448,2	0,4819
Medidor de vazão 1	1,58	108 tijolos maciços	226,8	0,031
Medidor de vazão 2	1,001	68 tijolos maciços	142,8	0,019976
Caixa de passagem	1,456	99 tijolos maciços	207,9	0,02905
Tanque séptico	8,9535	609 tijolos maciços	1278,9	0,1786
TOTAIS	57,95 m²	3358 tijolos	7135 kg	0,978 m³

Com o valor total de argamassa, foram calculados os quantitativos de areia, cal e cimento. Levando em consideração o traço de argamassa de 1:2:8, tem-se, sendo 11 o número total de partes, somando-se as porções de cimento, cal e areia (1+2+8 = 11):

<p>Total de cimento = $\frac{0,978 \text{ m}^3 \text{ de argamassa}}{11}$</p> <p>Total de cal = Total de cimento X 2</p> <p>Total de areia = Total de cimento X 8</p>

O consumo aproximado de água para a composição da argamassa é de 350 a 370 litros de água por metro cúbico de argamassa (MAIA, 2015). Com os cálculos seguindo a metodologia citada, pode-se mensurar os valores aproximados de cada item da argamassa, expressos na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores totais de água, cimento, cal e areia utilizados na composição da argamassa.

Construção		Composição da argamassa			
		Água	Cimento	Cal	Areia
Base da caixa d'água	Volume (m ³)	0,087875	0,0216	0,0432	0,1728
	Peso específico (kg/m ³)	999,97	1200	1700	1700
	Massa (kg)	87,88	25,92	73,44	293,76
Filtro	Volume (m ³)	0,1783	0,044	0,088	0,352
	Peso específico (kg/m ³)	999,97	1200	1700	1700
	Massa (kg)	178,30	52,57	149,6	598,4
Medidor de vazão 1	Volume (m ³)	0,01147	0,0028	0,0056	0,0224
	Peso específico (kg/m ³)	999,97	1200	1700	1700
	Massa (kg)	11,46	3,38	9,52	38,08
Medidor de vazão 2	Volume (m ³)	0,00739	0,0018	0,0036	0,0145
	Peso específico (kg/m ³)	999,97	1200	1700	1700
	Massa (kg)	7,3897	2,1792	6,1812	24,725
Caixa de passagem	Volume (m ³)	0,01075	0,00264	0,0052	0,0208
	Peso específico (kg/m ³)	999,97	1200	1700	1700
	Massa (kg)	10,75	3,169	8,84	35,36
Tanque séptico	Volume (m ³)	0,066110	0,01623	0,0324	0,129
	Peso específico (kg/m ³)	999,97	1200	1700	1700
	Massa (kg)	66,108	19,476	55,182	220,72
TOTAIS	TOTAIS (kg)	361,89	106,7	302,77	1211

Conforme Tabela 4, os valores de massa totais de água, cimento, cal e areia são 361,89 kg, 106,7 kg, 302,77 kg e 1211 kg, respectivamente. Para a medição da quantidade de concreto necessária para a fundação das construções, utilizou-se o método ABCP de dosagem de concreto (CURTI, 2013) e obteve-se a dosagem mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Dosagem de concreto

Volume total de concreto (m³)	Água (200 L/m³)	Areia (824,35 kg/m³)	Brita 1 (1104 kg/m³)	Cimento (344,83 kg/m³)
2,85 m ³	570 kg	2349,39 kg	3146,4 kg	982,77 kg

Os valores de água, areia, brita e cimento exibidos na tabela 5 foram somados aos quantitativos já apresentados anteriormente e chegou-se ao valor total de cada material, expostos nos resultados do trabalho.

4.3.2.2 Cenários alternativos à construção do sistema

Com a finalidade de verificar alternativas construtivas menos impactantes, foram elaborados cenários alternativos à construção do sistema. Assim, a quantidade total de materiais foi recalculada levando em conta as novas configurações do sistema.

Foram consideradas 4 situações, sendo 3 alternativas à situação real, sendo nomeadas da seguinte forma:

Situação 1 – ETE real.

Situação 2 – Considera a ETE com todas as etapas da ETE real, porém, neste caso, o *wetland* é escavado, não necessitando a utilização de tantos tijolos para a construção do sistema.

Situação 3 – Este cenário considera a ETE com filtro construído (idem à situação 1), porém, conta apenas com as etapas de TS + WCFV (eliminando todas as etapas que antecedem o TS).

Situação 4 – Considera apenas as etapas de TS + WCFV, sendo o WCFV escavado.

Para a avaliação dos impactos para cada situação criada, recalculou-se o ICV, utilizando a mesma metodologia de cálculo citada no item 4.3.2.1 e levando em conta o novo número de materiais de construção necessários. Os cálculos para quantitativo dos materiais das situações levantadas podem ser vistos nas Tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 – ICV Situação 2

Construção	Tipo e número de tijolos	Massa total de tijolos (kg)	Argamassa (m³)
Base do tanque de equalização	832 tijolos 6 furos	1830,4	0,2375
Medidor de vazão 1	108 tijolos maciços	226,8	0,031
Medidor de vazão 2	68 tijolos maciços	142,8	0,019976
Caixa de passagem	99 tijolos maciços	207,9	0,02905
Tanque séptico	609 tijolos maciços	1278,9	0,1786
Total de argamassa = 0,674 m³			
Cimento = Total/11	Cal = Cimento x 2	Areia = Cimento x 8	Água = 370 litros/m³ argamassa
0,0621 m³	0,1225 m³	0,490 m³	0,25938 m³
74,52 kg	208,25 kg	833 kg	259,372 kg

Tabela 7 – ICV Situação 3

Construção	Tipo e número de tijolos	Massa total de tijolos (kg)	Argamassa (m³)
<i>Wetland</i> construído	1642 tijolos maciços	3.448,2	0,4819
Medidor de vazão 2	68 tijolos maciços	142,8	0,019976
Caixa de passagem	99 tijolos maciços	207,9	0,02905
Tanque séptico	609 tijolos maciços	1278,9	0,1786
Total de argamassa = 0,70952			
Cimento = Total/11	Cal = Cimento x 2	Areia = Cimento x 8	Água = 370 litros/m³ argamassa
0,0645 m³	0,129 m³	0,516 m³	0,2625 m³
74,40 kg	219,3 kg	877,2 kg	262,51 kg

Tabela 8 – ICV Situação 4

Construção	Tipo e número de tijolos	Massa total de tijolos (kg)	Argamassa (m³)
Medidor de vazão 2	68 tijolos maciços	142,8	0,019976
Caixa de passagem	99 tijolos maciços	207,9	0,02905
Tanque séptico	609 tijolos maciços	1278,9	0,1786
Total de argamassa = 0,2276			
Cimento = Total/11	Cal = Cimento x 2	Areia = Cimento x 8	Água = 370 litros/m³ argamassa
0,0207 m³	0,0414 m³	0,1656 m³	0,0842 m³
24,84 kg	70,38 kg	281,52 kg	84,20 kg

4.3.2.3 Fase de operação

Para análise de ciclo de vida da fase de operação fez-se a média de 24 análises de cada parâmetro, realizadas no período de 29/09/2015 a 17/04/2016. Os parâmetros físico-químicos foram analisados em laboratório, com os métodos citados na Tabela 9.

Tabela 9 – Métodos analíticos para levantamento dos dados da fase operacional

Parâmetro	Método de análise	Fonte
DBO ₅	Manométrico (Oxitop)	APHA (2012)
DQO	Refluxo fechado colorimétrico	APHA (2012)
SDT	Gravimétrico	APHA (2012)
PT	Método colorimétrico do Ácido	APHA (2012)
NTK	Colorimétrico	APHA (2012)

A energia foi calculada levando em conta a potência da bomba:

Consumo da bomba 0,5 cV = 0,3677 kW.h
Horas de funcionamento = 0,5 hora /dia
Horas em 20 anos = 7300 horas (7300 dias)
Gasto energético em 20 anos = 1342,10 kWh

Para estimativa da emissão de gases, foram realizados cálculos, com base no IPCC (2013). Assim, para a emissão do gás metano, fez-se uso das Equações 1 e 2.

$$\text{Emissões de CH}_4 = \sum (\text{TOW}_j \times \text{Ef}_j) + \sum (\text{TOW}_{ij} \times \text{EF}_j) \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

CH₄ = em kg CH₄/ano

TOW_j = matéria orgânica total no esgoto em kg DBO/ano ou kg DQO/ano

Ef_j = fator de emissão, em kgCH₄/kgDBO (para esgoto doméstico)

i = setor industrial

j = tipo de *wetland*

$$\text{EF}_j = \text{Bo} \times \text{MCF}_j \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

B_o = capacidade máxima de produção de CH_4 , expressa em $kgCH_4/kgDBO$

B_o para esgoto doméstico = $0,6 kgCH_4/kgDBO$

MCF = fator de correção do metano = $0,01$ para *wetland* vertical

j = tipo de *wetland*

Assim:

$$EF_j = B_o \times MCF_j$$

$$EF_j = 0,6 kgCH_4/kgDBO \times 0,01$$

$$EF_j = 0,006 kgCH_4/kgDBO$$



$$\text{Total de } CH_4 = TOW_j \times EF_j$$

$$\text{Total de } CH_4 = 0,006 kgCH_4/kgDBO \times kgDBO \text{ em 20 anos}$$

O valor de Óxido Nitroso foi obtido através da Equação 3.

$$\text{Emissões de } N_2O = \sum_j (N_j \times EF_j \times 44/28) + \sum_{i,j} (N_{ij} \times EF_j \times 44/28) \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

Emissão de N_2O = em $kg N_2O/ano$

N_j = Nitrogênio total no esgoto doméstico em kg

$N_{i,j}$ = Nitrogênio total no esgoto industrial em kg/ano

EF_j = fator de emissão, em $kgN_2O/kg N = 0,00023 kgN_2O/kgNTK$ (IPCC, 2013)

$44/28$ = Para transformar em N_2O

i = setor industrial

j = tipo de *wetland*

O volume total de esgoto estimado para ser tratado em 20 anos é de aproximadamente $10.957,50 m^3$. Assim, os impactos ambientais são calculados levando em consideração este volume total de esgoto tratado.

4.3.3 Avaliação de Impactos

Para avaliar os impactos ambientais do sistema, foram realizadas as etapas obrigatórias citadas nas NBRs 14.040 e 14.044 (ABNT, 2009), descritas no item 4.5.3.1. A biblioteca de dados utilizada foi a Ecoinvent 3.1[®] e o método variou de acordo com cada etapa, levando em conta aquele que apresentasse maiores dados em relação à fase avaliada. Assim, utilizou-se o método ReCiPe para a fase de construção do sistema e o método CML para a fase de operação. Fez-se ainda uso do método Demanda Acumulada de Energia, para análise dos impactos de mesmo nome causados na construção da ETE.

As categorias de impacto mais representativas em todos os processos de análise encontram-se descritas a seguir.

Aquecimento Global (Mudanças Climáticas): Os gases como o CO₂, N₂O, CH₄, dentre outros, são os principais responsáveis pela ocorrência desse impacto, pois são causadores do aumento da radiação infravermelha na superfície da terra, impedindo a dispersão dos raios solares e causando o aquecimento global. O potencial de impacto é expresso em kg CO₂ equivalente/kg de emissão.

Eutrofização de água doce e marinha: A eutrofização dos ambientes aquáticos ocorre quando há uma disposição de nutrientes, elevando a biomassa. Este aumento de nutrientes causa o crescimento da biomassa na lâmina d'água e impede a passagem de luz, diminuindo a fotossíntese e o oxigênio dissolvido. Este impacto altera as condições do meio, afetando a diversidade. O potencial de eutrofização é expresso em kg P equivalente/kg de emissão.

Toxicidade Humana: Expressa em kg de 1,4 diclorobenzeno equivalente/kg de emissão, este impacto é causado pelas substâncias que apresentam características tóxicas e não biodegradáveis, como metais por exemplo. A caracterização desta categoria de impacto leva em consideração critérios como destino, exposição e efeitos da exposição a estes compostos.

Ecotoxicidade de água doce e marinha: Sendo expressa também em kg de 1,4 diclorobenzeno/kg de emissão, este impacto é causado por substâncias tóxicas emitidas para o ar, solo ou água nos ecossistemas. A redução da produção agrícola e da biodiversidade da flora e da fauna são consequências desta categoria de impacto.

Demanda Acumulada de Energia: Expressando em MJ equivalente, este método considera toda a energia consumida em todas as etapas de produção de

determinado produto, analisando individualmente cada tipo de energia, seja ela renovável ou não-renovável.

Formação de Oxidantes Fotoquímicos: Sendo a consequência da reação fotoquímica entre óxidos de nitrogênio e substâncias voláteis com a luz solar, também é chamado de *smog* fotoquímico. Formam uma barreira que impede a capacidade de fotossíntese devido á luminescência solar. São calculados em kg de NMVOC (compostos orgânicos não metânicos) equivalente/kg de emissão e podem causar dores, irritações e problemas respiratórios.

4.3.4 Interpretação dos resultados

A interpretação da ACV foi feita através de diversas simulações no SimaPro[®], com o intuito de identificar os pontos mais relevantes de todo o processo. As simulações foram realizadas considerando vários dados do ICV da fase de construção e operação, afim de avaliar-se os dados que mais interferem na ocorrência dos impactos ambientais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV

Para a elaboração do Inventário de Ciclo de Vida foi realizado um levantamento de dados da fase construtiva e operacional. Para a fase construtiva foram considerados os materiais de construção utilizados na obra da ETE, levando em conta o tipo de construção e material utilizado em cada uma delas. Na fase operacional, os dados levantados foram DBO, DQO, NTK, PT, sólidos suspensos totais, gás metano e óxido nitroso.

5.1.1 Construção

O Inventário do Ciclo de Vida da fase de construção do sistema encontra-se na Tabela 10. Os valores apresentados na tabela referem-se à massa total de cada material quantificado de acordo com a metodologia citada.

Tabela 10 – Inventário do Ciclo de Vida da Fase de Construção do sistema

Esgoto tratado em 20 anos (saída) = 10.957,50 m³			
Materiais (Entradas)	Nomenclatura SimaPro[®]	Massa total (kg)	Correlação (kg/m³)
Água	<i>Tap water, at user, production</i>	22.931,89	2,093
Cimento	<i>Cement, Portland, production</i>	1.089,47	0,099
Areia	<i>Sand, market for</i>	3.560,39	0,325
Brita	<i>Gravel crushed, production</i>	27.059,50	2,47
Tijolos	<i>Brick, production</i>	7.135	0,651
PVC	<i>Extrusion plastic pipes, production</i>	30,0	0,003
Cal	<i>Lime hydrated packed</i>	302,77g	0,028
Aço	<i>Reinforcing steel, production</i>	187,59	0,017
Fibra de vidro	<i>Glass fibre, production</i>	45,0	0,004

O quantitativo de materiais foi lançado no SimaPro 8[®] levando em conta a correlação encontrada para cada material, ou seja, o quantitativo total dividido pelo volume total de esgoto tratado em 20 anos. Sendo assim, a maior correlação é a da brita, material tido em maior quantidade, seguido pela água.

5.1.2 Alternativas à construção do sistema

Os ICV dos cenários alternativos à construção do sistema podem ser vistos nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 – ICV Situação 2

Material	Quantidade TOTAL (kg)	Correlação (kg/m³)
Cimento	74,52	0,007
Areia	833,0	0,076
Água	22258,71	2,031
Brita	23.913,10	2,183
Tijolos	3686,8	0,336
PVC	30,0	0,003
Cal	208,25	0,019
Fibra de vidro	45,0	0,004

Neste caso, é possível verificar uma diferença significativa na quantidade total de tijolos, cimento, areia, brita e cal em relação à Situação 1. Os dados mostram que apenas a brita de preenchimento do filtro é considerada, uma vez que neste caso não faz-se uma fundação de concreto no filtro.

Tabela 12 - ICV Situação 3

Material	Quantidade TOTAL (kg)	Correlação (kg/m³)
Cimento	74,40	0,007
Areia	877,2	0,080
Água	22261,85	2,031
Brita	27.059,50	2,47
Tijolos	5077,8	0,463
PVC	30,0	0,003
Cal	219,3	0,020
Aço	187,59	0,017

Na situação 3 não há diferença tão significativa no quantitativo de materiais, uma vez que são poucas as modificações que ocorrem na fase de construção em relação à Situação 1.

Tabela 13 – ICV Situação 4

Material	Quantidade TOTAL (kg)	Correlação (kg/m ³)
Cimento	28,84	0,002
Areia	281,52	0,025
Água	22083,54	2,015
Brita	23.913,10	2,182
Tijolos	1629,6	0,149
PVC	30,0	0,003
Cal	70,38	0,006

Na situação 4, há uma diminuição significativa em praticamente todos os materiais, uma vez que se trata de um sistema muito mais simples em relação à ETE real (situação 1). Vale ressaltar que o PVC permaneceu com o valor inalterado em todas as situações, uma vez que a alteração em cada cenário é muito pequena, bem como é um material pouco impactante na construção do sistema.

5.1.3 Operação

As entradas e saídas consideradas para o Inventário da fase operacional do sistema foram os parâmetros mostrados na Tabela 14.

Tabela 14– Entradas e saídas da fase operacional

Parâmetro	Total de esgoto tratado – 10.957,50 m ³				Nomenclatura <i>SimaPro</i> [®]
	Entrada (kg)	Correlação (kg/m ³)	Saída (kg)	Correlação (kg/m ³)	
DBO ₅	2083,38	0,19	909,14	0,083	<i>BOD₅, Biological Oxygen Demand</i>
DQO	4446,64	0,41	2048,79	0,187	<i>COD, Chemical Oxygen Demand</i>
SST	5426,71	0,49	3001,83	0,274	<i>Suspended solids, unspecified</i>
PT	167,90	0,015	96,80	8,84E-03	<i>Phosphorus, total</i>
NTK	1030,61	9,4 E-05	372,41	0,033	<i>Nitrogen, total</i>
N-NH ₄	675,92	0,061	317,28	0,029	<i>Ammonia, as N</i>
CH ₄	-	-	30,22	2,7E-06	<i>Methane</i>
N ₂ O	-	-	0,41	3,75E-05	<i>Dinitrogen monoxide</i>

Da mesma forma que na fase de construção, os valores totais da fase operacional também foram divididos pelo volume total de esgoto tratado, chegando-se à unidade kg/m³ de esgoto tratado. Esta igualdade de unidade em todos os processos permite a comparação de qualquer cenário.

5.2 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

5.2.1 Construção

5.2.1.1 Normalização

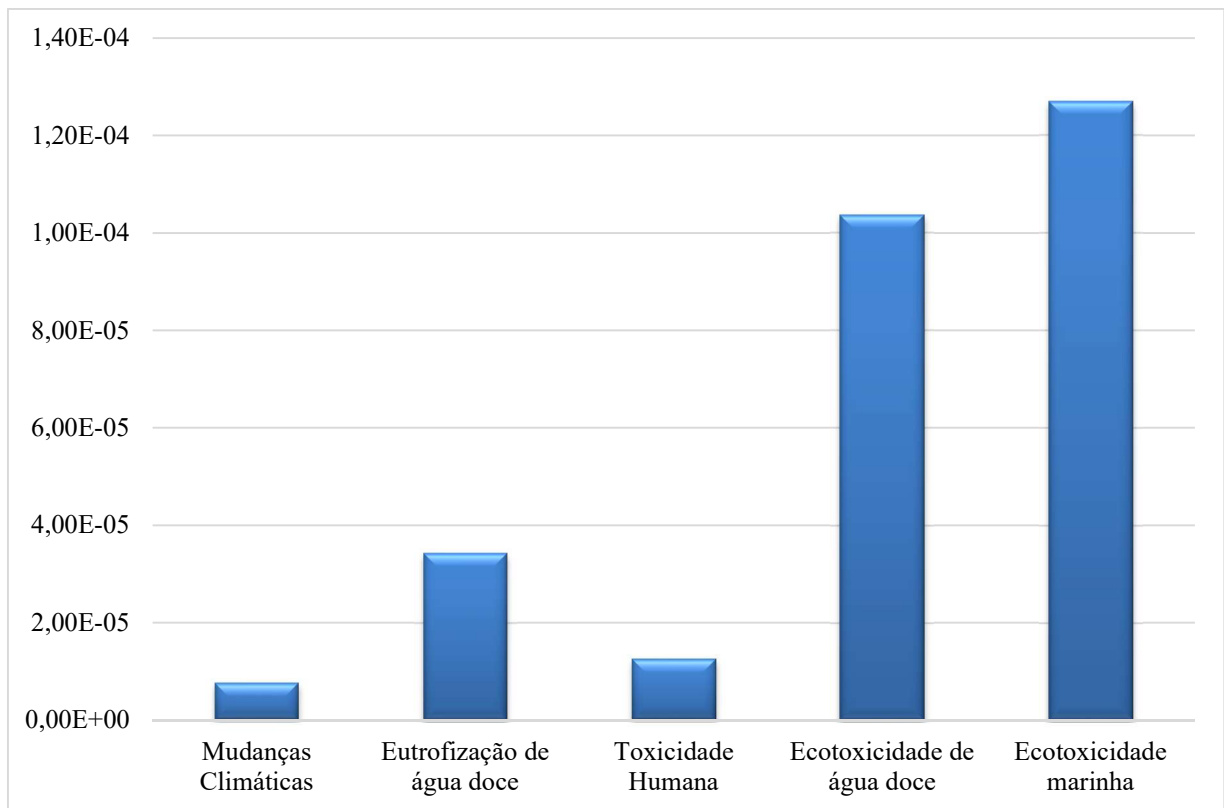
Com o intuito de se verificar as categorias que representam maior impacto a nível global, fez-se a normalização da fase construtiva. Chehebe (1998) e Roux et al. (2010) explicam que a normalização tem como objetivo ajudar a compreender melhor a magnitude relativa de cada indicador. Por exemplo, a quantidade de CO₂ equivalente (kg) emitida pela ETE dividida pela quantidade total de CO₂ equivalente emitida em todo o mundo em determinado ano de referência.

Assim, fez-se a normalização da construção utilizando-se o método ReCiPe, com o ano de 2015 como referência, e obteve-se os resultados mostrados na Figura 14.

Com base nos resultados exibidos na Figura 14, citam-se as categorias de impacto ecotoxicidade de água doce e ecotoxicidade marinha como as mais impactantes a nível global, seguidas pela eutrofização de água doce, pela toxicidade humana e mudanças climáticas. Vale ressaltar que estes impactos podem ser considerados baixos, uma vez que estão na faixa de 10⁻⁵ e 10⁻⁴.

Através dos resultados encontrados com a normalização, foi realizado um estudo mais aprofundado (caracterização) para analisar o que ocasiona cada uma das categorias de impacto mais relevantes na fase estudada.

Figura 14 - Normalização da fase de construção com as categorias de impacto mais relevantes, com uso do método ReCiPe



5.2.1.2 Caracterização

Para a análise dos impactos ambientais causados pela fase de construção do sistema fez-se a caracterização no SimaPro® por meio do método ReCiPe, para as categorias de impacto mudanças climáticas, eutrofização de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce e ecotoxicidade marinha.

Com o levantamento de todos os dados da fase de construção do sistema, foram encontradas as categorias de impacto mais relevantes no processo, citadas no item anterior. Na figura 15 pode-se verificar a contribuição de cada material nas categorias citadas.

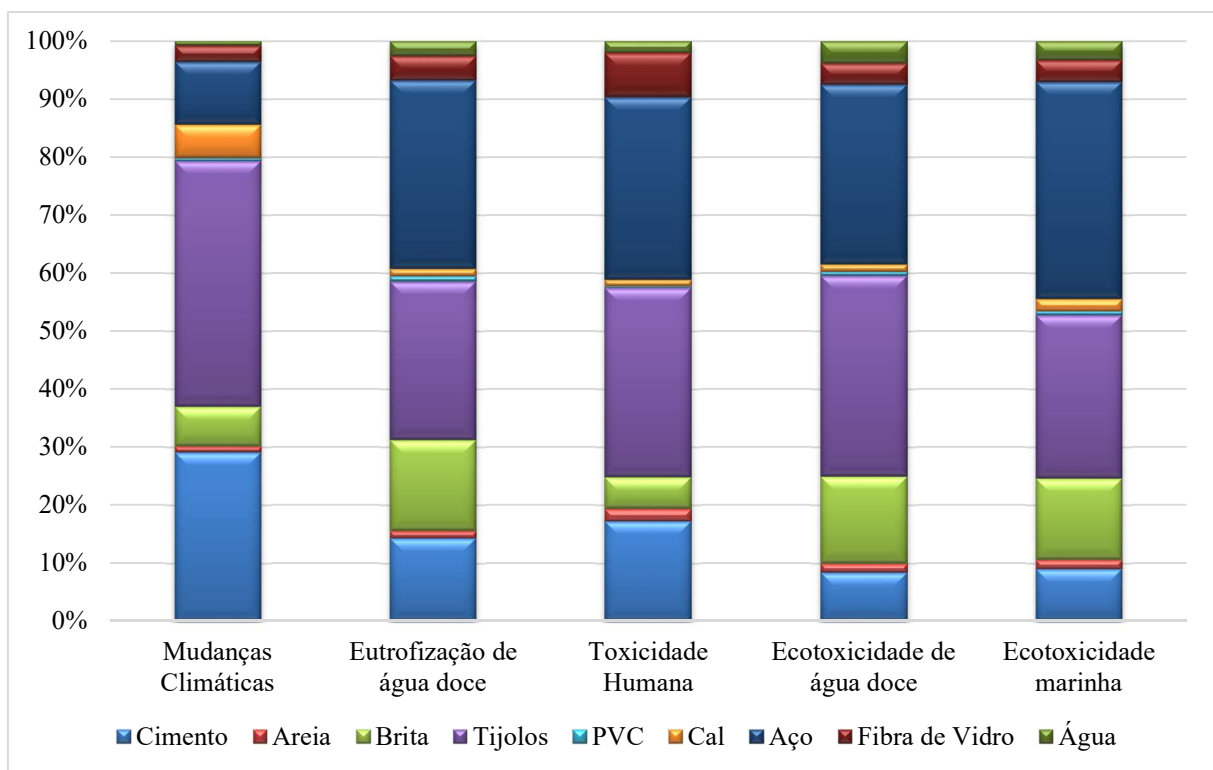
Na categoria mudanças climáticas, tem-se os tijolos como o material mais impactante, representando 42,7% dos impactos, seguido pelo cimento (29,5%), pelo aço (11,3%) e pela brita (6,94%).

A eutrofização de água doce é causada, principalmente, pelo aço, responsável por 34,4% dos impactos nesta categoria. Os tijolos representam 28,1% dos impactos,

enquanto a brita, o cimento e a fibra de vidro representam 16,2%, 14,8% e 4,3% dos impactos, respectivamente.

Mais uma vez os tijolos são tidos como o material mais impactante na categoria toxicidade humana, contribuindo com 33,4% dos impactos, sendo seguido pelo aço, com 33,1%. Nesta categoria tem-se ainda o cimento e a fibra de vidro, com 17,7% e 7,83%, respectivamente.

Figura 15 – Caracterização da fase construtiva com as categorias de impacto mais relevantes, com uso do método ReCiPe



A ecotoxicidade de água doce é causada 36% pelos tijolos, 33,3% pelo aço, 15,7% pela brita e 8,81% pelo cimento; enquanto a ecotoxicidade marinha é causada 39,9% pelo aço, 29,1% pelos tijolos, 14,6% pela brita e 9,4% pelo cimento. A fibra de vidro representa 3,84% dos impactos em ambas as categorias.

Com estes dados, verifica-se os tijolos e o aço como os materiais mais impactantes, uma vez que representaram maior percentual de impacto em todas as categorias, seguidos pelo cimento.

A areia, a cal, o PVC e a fibra de vidro são os materiais que menos influenciam para a ocorrência dos impactos ambientais, representando de 1 a 8% nas categorias

estudadas. Nesta categoria de menores impactantes pode ser citado ainda o consumo de água, com menos de 5% em todas as categorias.

Com a análise de rede, no *software*, verifica-se que o impacto causado pelos tijolos está relacionado à eletricidade gasta em todo o seu processo de fabricação. Através do *software*, verifica-se a utilização de 0,03 kWh para a fabricação de 1 kg de tijolos de cerâmica. Sendo assim, para a fabricação dos 7.135 kg de tijolos utilizados na construção do sistema, estima-se a utilização de 177,51 kWh de energia.

Souza et al. (2015) realizaram um estudo comparativo entre os tijolos de cerâmica e os de concreto e concluíram que os de cerâmica são menos impactantes ao meio ambiente do que os de concreto. Sendo assim, pode-se dizer que, mesmo tendo-se este consumo de energia na fabricação dos tijolos utilizados, este tipo de material ainda é menos impactante do que outros disponíveis para o mesmo fim.

O *clinker*, matéria-prima básica do cimento, é um material resultante da calcinação de uma mistura de calcário, argila e componentes químicos (silício, alumínio e ferro), o que o torna o responsável pelos impactos causados na cadeia produtiva do cimento, uma vez que ocorre a liberação, no ar, do CO₂ gerado na descarbonatação.

Os impactos causados pelo aço estão relacionados à utilização da cal e do ferro utilizados na sua fabricação.

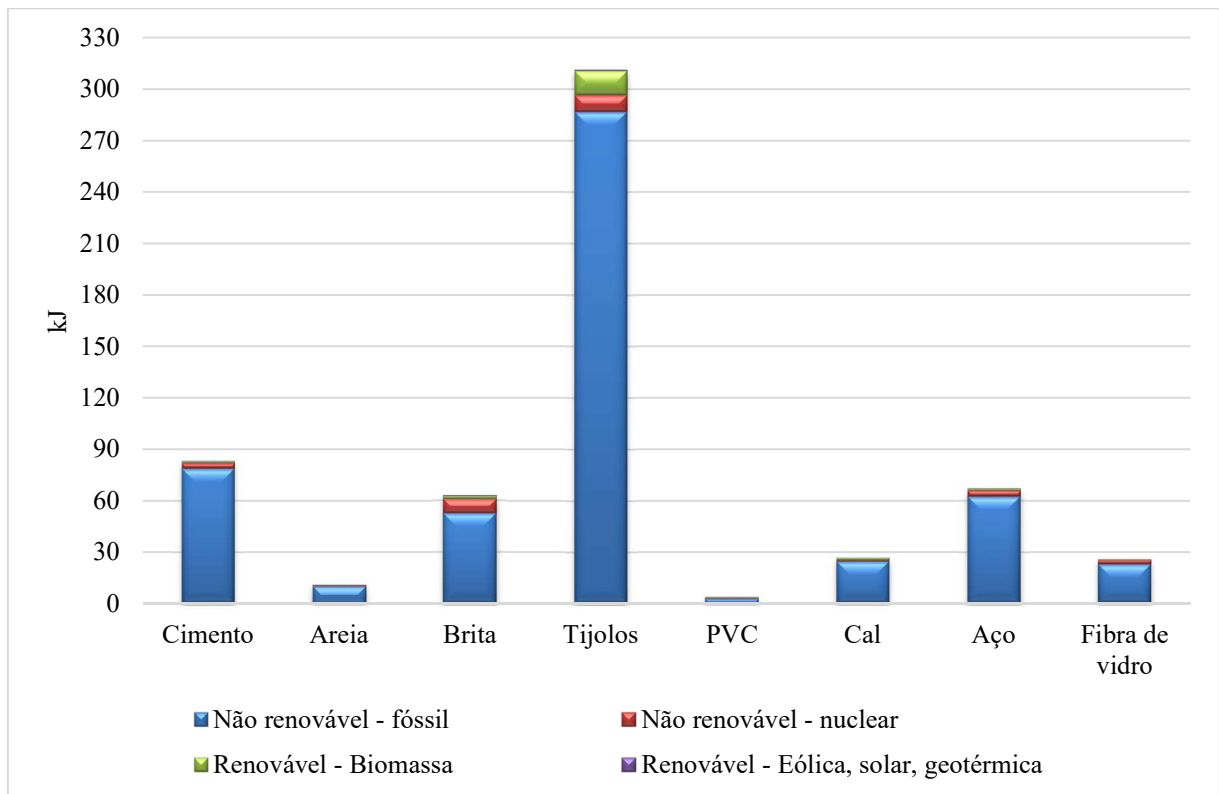
Mesmo com os impactos encontrados na pesquisa, vale ressaltar que os sistemas de *wetlands* construídos ainda apresentam menores impactos ambientais em sua fase construtiva do que sistemas de tratamento mais complexos. Machado et al. (2006), por exemplo, realizaram um comparativo entre sistemas de *wetlands* construídos, sistema de infiltração lenta e lodo ativado e concluíram que os *wetlands* são mais vantajosos ambientalmente por utilizarem menor quantidade de material de construção do que outros sistemas. Fuchs, Mihelcic e Gierke (2011) associaram ainda menores impactos ambientais na construção de sistemas verticais do que horizontais pelo mesmo motivo.

5.2.1.3 Demanda acumulada de energia

Para avaliação do consumo energético para a fabricação de cada material de construção utilizado no sistema, foi feito um estudo dos tipos de energia consumida

através do método Demanda de Energia Acumulada. Na figura 16 são mostrados os resultados da energia acumulada para cada material utilizado.

Figura 16 – Pontuação única da Demanda acumulada de energia dos materiais de construção



Com a Figura 16, certifica-se mais uma vez que os tijolos são os que mais consomem energia dentre todos os materiais, seguido pelo cimento, aço, brita, fibra de vidro, cal, areia e PVC.

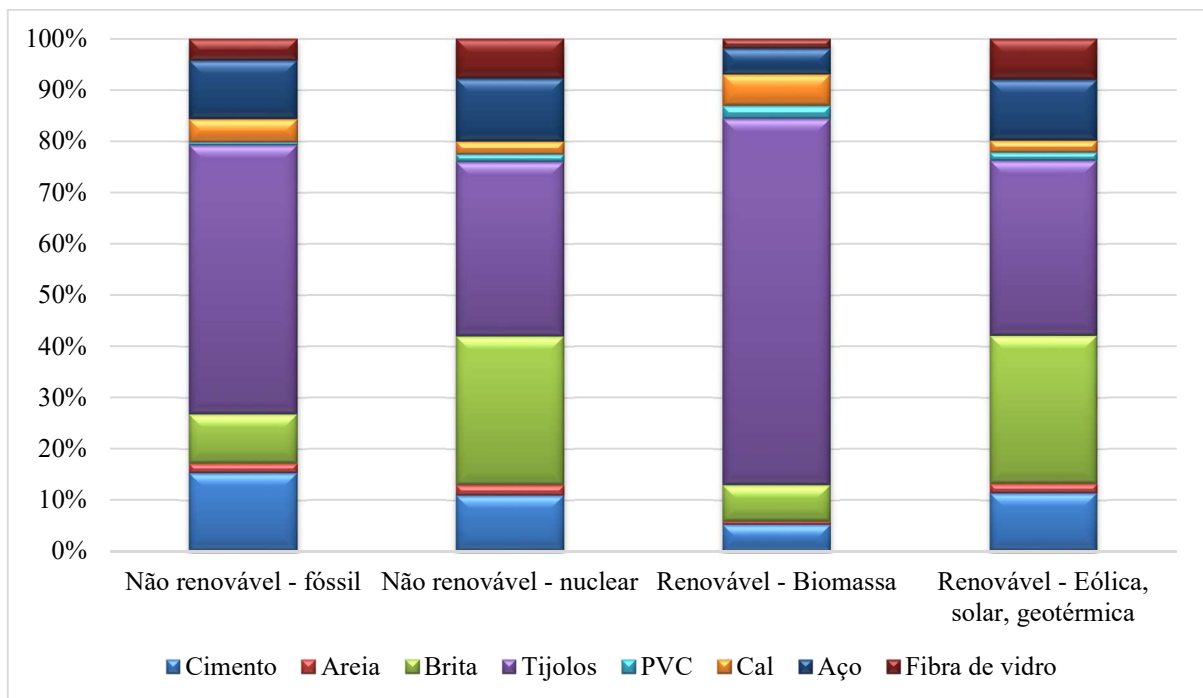
Observa-se que, dentre os tipos de energia que podem ser utilizados nos processos de fabricação de cada material, a energia fóssil (não-renovável) é a mais consumida em todos os materiais. A energia renovável de biomassa representa uma quantidade pequena na cadeia produtiva dos tijolos e a nuclear também está em baixa quantidade na fabricação dos demais materiais.

Vale ressaltar que as energias renováveis são aquelas que podem ser aproveitadas ao longo do tempo sem que suas fontes se esgotem, enquanto as não-renováveis fazem uso de recurso teoricamente limitados. As energias não renováveis fazem uso de fontes como o petróleo, carvão e gás natural, que podem vir a ser esgotados da natureza.

Assim, é mais ambientalmente viável que se faça uso das energias renováveis, utilizando-se a biomassa, o vento (energia eólica), o sol (energia solar), dentre outras, que não causarão este esgotamento de algum recurso.

Para verificar a representatividade de cada material no consumo total de cada tipo de energia envolvida no processo de fabricação dos materiais de construção utilizados, realizou-se a caracterização da Demanda Acumulada de Energia (Figura 17).

Figura 17 – Caracterização da Demanda Acumulada de Energia dos materiais de construção



Na figura 17 mostra-se o percentual que cada material consome da energia total consumida na fabricação de todos os materiais.

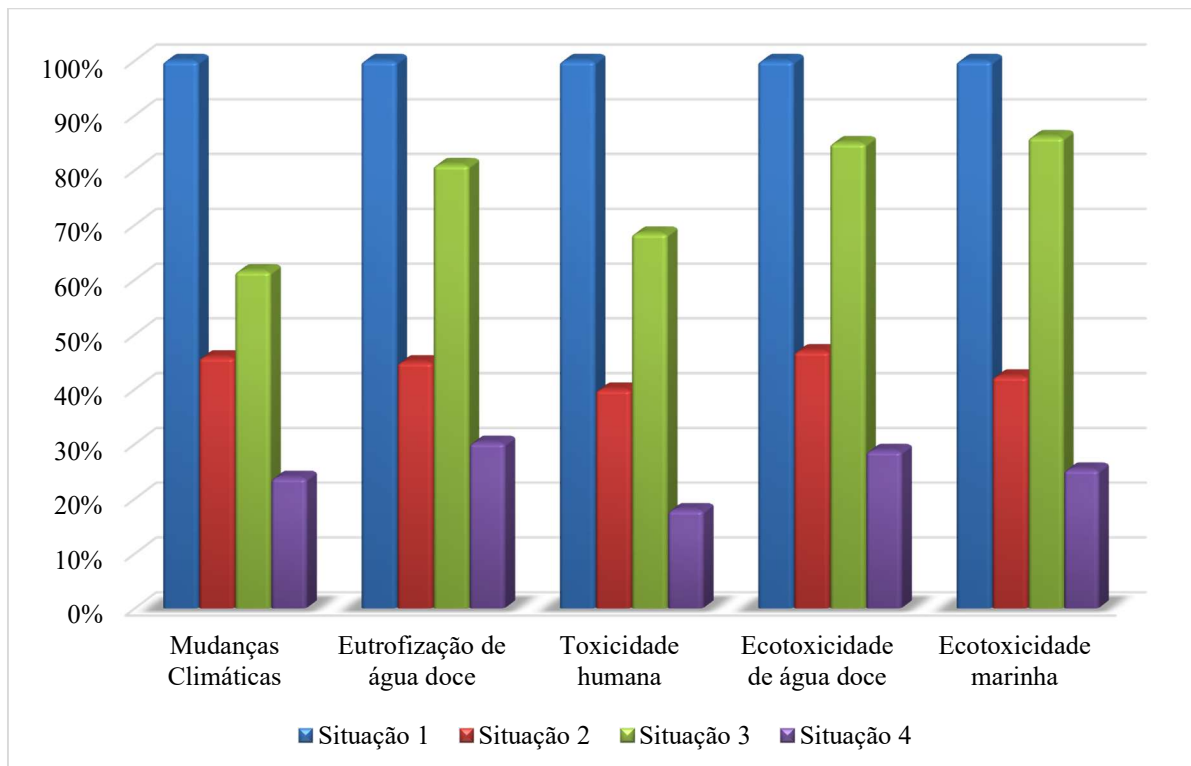
Analisando os resultados da caracterização verifica-se, mais uma vez, o tijolo como o material que mais consome energia em toda a sua produção. Este representa de 34% da energia nuclear a 71,5% da energia de biomassa. Aqui, percebe-se que, mesmo sendo o material que mais consome energia, o tijolo ainda é o que representa o maior consumo de energia renovável de biomassa dentro do processo.

Os tijolos representam 53% do total de energia fóssil utilizada, enquanto o cimento utiliza 15,5% desse total e o aço 11,6%. 34% da energia nuclear é utilizada no processo de fabricação dos tijolos, 29% na produção da brita e 12% na do aço.

5.2.2 Cenários alternativos à construção do sistema

Os impactos ambientais causados pelos cenários alternativos de construção do sistema podem ser vistos na Figura 18.

Figura 18 – Comparativo das 4 situações construtivas. Situação 1 (ETE real); Situação 2 (*wetland* escavado); Situação 3 (*wetland* construído + TS); Situação 4 (TS + *wetland* escavado).



Observa-se que as Situações 2 e 4, em que o *wetland* construído é escavado, os impactos ambientais são relativamente menores às situações 1 e 3, onde o *wetland* é construído em alvenaria. Isso já era esperado, devido à diminuição da quantidade necessária de tijolos e cimento e a eliminação do aço, materiais tidos como mais impactantes na ETE real. Porém, conforme já citado, os sistemas de *wetlands*

construídos de fluxo vertical são ainda os que menos necessitam materiais de construção.

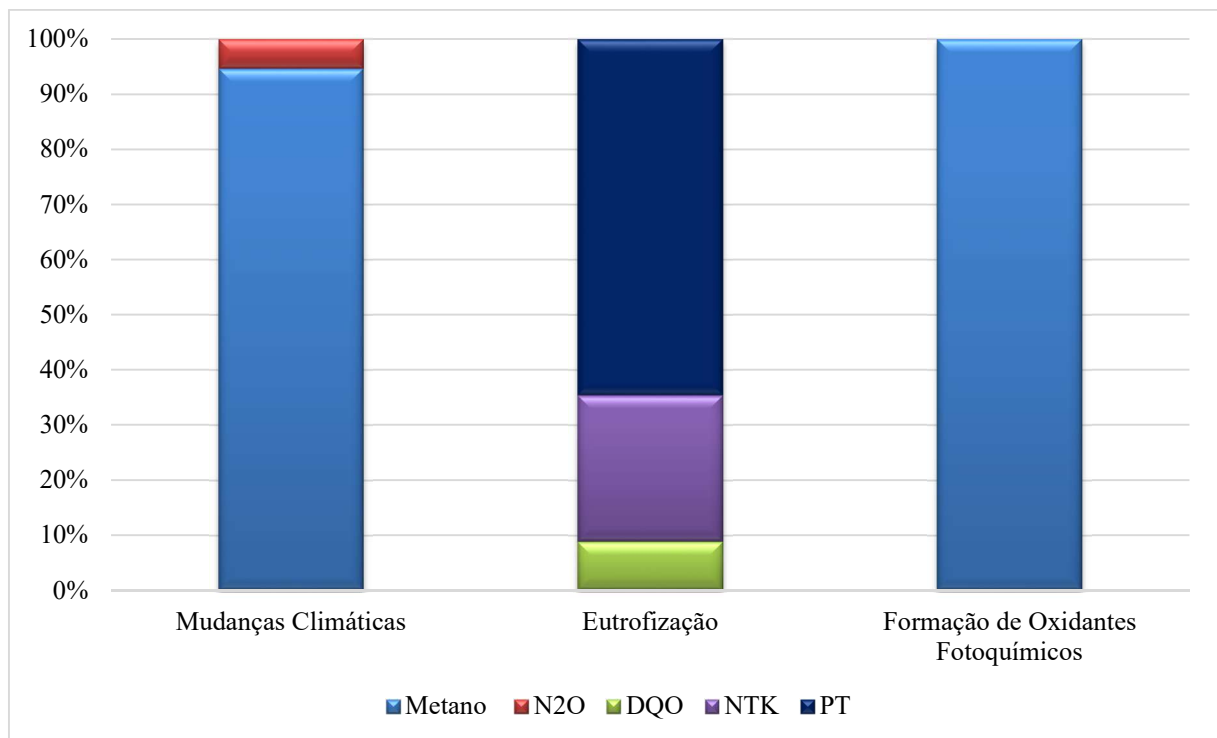
A situação 4 é tida como a menos impactante, uma vez que representa um potencial de impacto de 60 a 85% menor que a Situação 1 (ETE real), dependendo da categoria.

5.2.3 Operação

5.2.3.1 Caracterização

Para análise dos impactos ambientais da fase de operação do sistema, fez-se uso do Método CML e foram identificadas as categorias de mudanças climáticas, eutrofização e formação de oxidantes fotoquímicos. Na figura 19 estão expostos os resultados encontrados nestas categorias.

Figura 19 – Caracterização da operação do sistema com as categorias de impacto mais relevantes, com uso do método CML.



Com os resultados, observa-se a ocorrência da categoria mudanças climáticas relacionada à emissão dos gases gerados durante o tratamento no *wetland*: o Metano

e o Óxido Nitroso, sendo o CH₄ responsável por 95% da ocorrência do impacto, e o N₂O, com 5%. Vale ressaltar que esta emissão é mínima comparada a outros sistemas de tratamento de esgoto. Machado et al. (2004) asseguram ainda que estes sistemas auxiliam na redução da categoria aquecimento global, uma vez que possuem características de absorção do CO₂ pelas plantas.

Segundo o IPCC (2013), para o cálculo da emissão de CH₄ em *wetlands*, utiliza-se a capacidade máxima de geração de Metano de 0,6 kgCH₄/kg DBO tratada e multiplica-se por um fator de correção de metano (conforme visto na metodologia). Este fator de correção é de 0,01 para *wetlands* verticais e de 0,1 para horizontais.

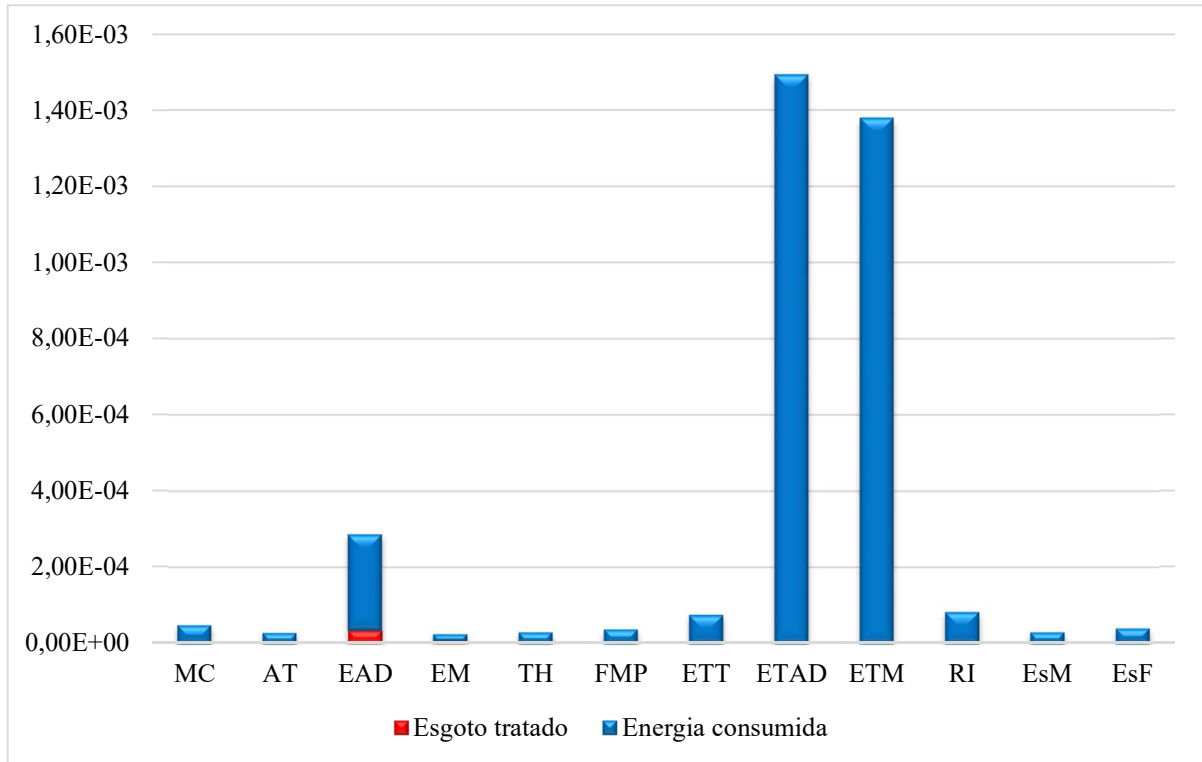
A eutrofização, neste método considerando a de água doce e marinha juntas, é causada 8,80% pela DQO, 26,53% pelo NTK e 64,63% pelo PT. Roux et al. (2010) atribuem a ocorrência da categoria eutrofização à incompleta remoção de nitrogênio e fósforo nestes sistemas, o que ficou comprovado nesta pesquisa.

A formação de oxidantes fotoquímicos é causada unicamente pelo gás metano. A DBO, os sólidos e a amônia não foram detectados em nenhum método simulado no *software*.

5.2.3.2 *Energia para funcionamento do sistema*

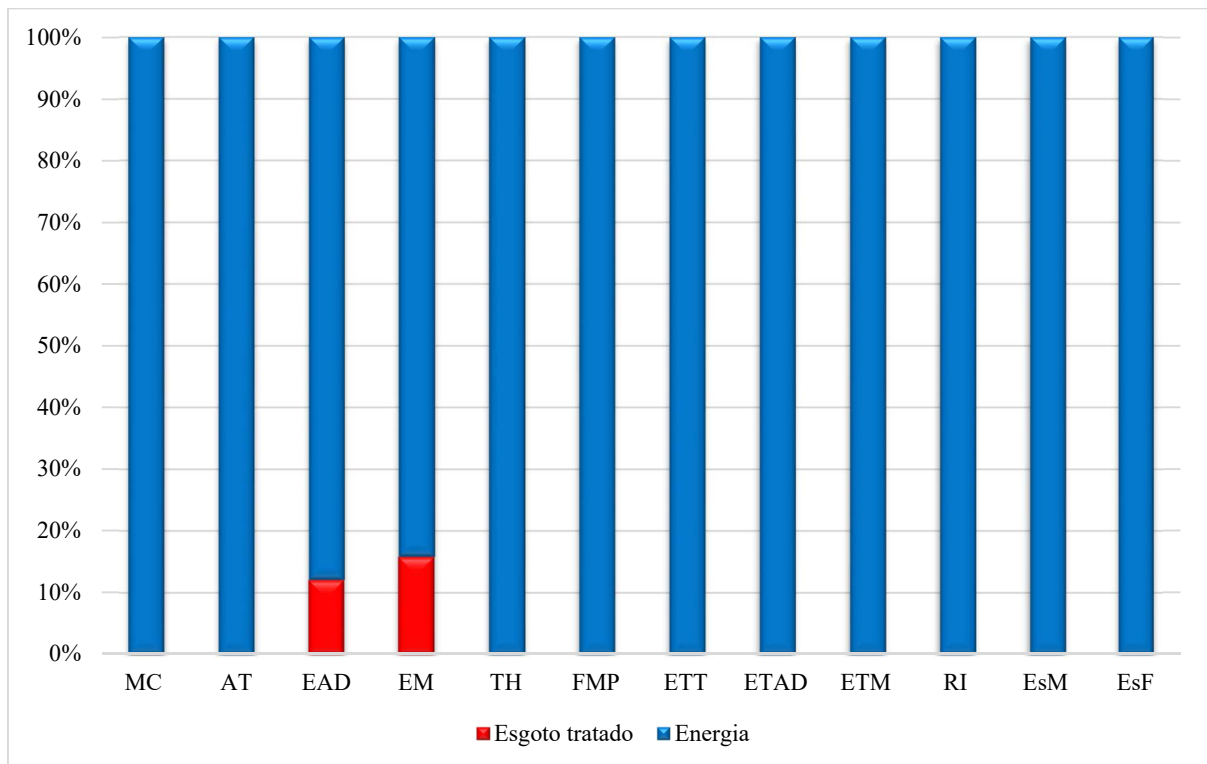
Para o funcionamento do sistema, conta-se com uma bomba de 0,5cV, acionada por aproximadamente 30 minutos por dia (estimativa). Assim, tem-se, em 20 anos de funcionamento um total de 1342,10 kWh de energia consumidos. Com esses dados fez-se a estimativa de impactos ambientais no *SimaPro*[®] com uso do método ReCiPe, comparando-os com os impactos causados pelo lançamento do esgoto tratado (fase operacional). Os resultados podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20 – Normalização energia x esgoto tratado, com uso do método ReCiPe. Mudanças Climáticas (MC); Acidificação Terrestre (AT); Eutrofização de água doce (EAD); Eutrofização Marinha (EM); Toxicidade Humana (TH); Formação de material particulado (FMP); Ecotoxicidade terrestre (ETT); Ecotoxicidade de água doce (ETAD); Ecotoxicidade Marinha (ETM); Radiação ionizante (RI); Esgotamento de metais (Esm); Esgotamento fóssil (EsF).



Com a comparação entre o tratamento de esgoto e a energia consumida durante todo o tempo de vida útil considerado no estudo, percebe-se que a energia gera algum impacto em todas as categorias analisadas. Na normalização, o esgoto tratado tem representatividade apenas na categoria de eutrofização de água doce. Em seguida, na figura 21, verifica-se a caracterização deste comparativo.

Figura 21 – Caracterização energia x esgoto tratado



Na caracterização pode-se perceber que o esgoto tratado representa 11% dos impactos da categoria eutrofização de água doce e 15% da eutrofização marinha. Nas demais categorias, a energia representa 100% dos impactos.

Hoybie et al. (2008) asseveram que os sistemas de *wetlands* construídos consomem menos energia que outros sistemas de tratamento de esgoto. Mesmo o consumo de energia sendo baixo, pode ocasionar impactos ambientais. Ainda assim, é importante que se busquem alternativas a este consumo de energia, como por exemplo, o uso de energias renováveis, que diminuiriam ainda mais os impactos causados.

6 CONCLUSÕES

Com o trabalho realizado, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Quanto à elaboração do Inventário de Ciclo de Vida

Os dados inventariados foram medidos diretamente na ETE, dando mais credibilidade à pesquisa. Parte das pesquisas realizadas utilizam dados estimados, sem medições diretas. Os dados construtivos foram levantados considerando a área total de cada etapa construída e as características de cada uma. Os materiais tidos em maior quantidade foram a brita de preenchimento do filtro e a água utilizada na lavagem das britas e na composição do cimento e argamassa.

Na fase operacional, o valor considerado de cada parâmetro foi a média obtida de um total de 24 análises, realizadas de 29/09/2015 a 17/04/2016. Os parâmetros considerados foram a DBO, DQO, NTK, PT, sólidos suspensos, gás metano e óxido nitroso.

- Quanto aos impactos causados pela construção da ETE:

Os materiais de construção que apresentaram maior impacto negativo foram os tijolos, representando de 29,1% dos impactos na categoria ecotoxicidade marinha a 42,7% na categoria aquecimento global; o aço, causando de 11,3 a 39,9% nas categorias aquecimento global e ecotoxicidade marinha, respectivamente; e o cimento, responsável por 29,5% do aquecimento global e 17,7% da toxicidade humana.

As categorias de impacto mais relevantes foram a ecotoxicidade de água doce e a marinha. Os impactos ambientais dos tijolos são provenientes, principalmente, da energia consumida em toda a sua cadeia produtiva. O *clinker* é o principal fator de impacto do cimento e a cal e o ferro utilizados na fabricação do aço são os maiores responsáveis pelos impactos causados por este material.

- Quanto à Demanda Acumulada de Energia dos materiais de construção:

Neste item ficou, mais uma vez, expressa a energia consumida durante a fabricação dos tijolos, sendo o material que apresentou a maior demanda acumulada de energia durante a sua cadeia produtiva, seguido pelo cimento e pelo aço. O total de energia consumida na fabricação dos tijolos é de 177,51 kWh (cálculo realizado de acordo com dados do SimaPro). O tipo de energia mais utilizada na produção em todos os materiais é a energia não renovável fóssil.

- Quanto aos impactos causados pela operação da ETE:

As categorias de impacto que mais apresentaram dados relevantes na fase de operação do sistema foram mudanças climáticas, referente ao Metano (responsável por 95% da ocorrência do impacto) e ao Óxido Nitroso (representando 5% dos impactos); a eutrofização, causada pela 8,80% pela DQO, 26,53% pelo NTK e 64,63% pelo PT e; a formação de oxidantes fotoquímicos, ocasionada 100% pela liberação de Metano. Os parâmetros DBO, sólidos suspensos e amônia não foram detectados em nenhum método simulado no SimaPro®.

- Quanto à energia gasta para o tratamento de efluente:

A energia total consumida nos 20 anos de vida útil considerados no estudo é de 1342,10 kWh. Esta energia consumida para o funcionamento da ETE gera impactos em todas as categorias analisadas, sendo a ecotoxicidade de água doce e marinha as mais impactantes, seguidas pela eutrofização de água doce.

A energia consumida comparada ao impacto do lançamento do efluente tratado apresentou mais impactos em todas as categorias, sendo que, na comparação, o esgoto tratado apresentou impactos representativos apenas na categoria de eutrofização de água doce.

- Quanto às alternativas de construção do sistema:

Dentre as 4 situações analisadas, a situação 4 (TS + *wetland* escavado) foi a menos impactante, por necessitar de menor quantidade de materiais de construção.

A situação 4 chegou a representar de 70 a 85% menos impactos ambientais, dependendo da categoria, do que a situação 1 (ETE real).

Isso já era esperado pelo fato da diminuição significativa na quantidade de materiais utilizados.

- Quanto às categorias de impacto mais relevantes:

As categorias de impacto mais relevantes foram mudanças climáticas e eutrofização, ambas nas fases de construção e operação, formação de oxidantes fotoquímicos (fase de operação), toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce e marinha (fase de construção).

- Quanto à utilização do SimaPro8®:

A utilização do *software* SimaPro8® não permitiu a análise dos parâmetros DBO, sólidos e amônia em nenhum dos métodos utilizados. Mesmo assim, permitiu a realização de um estudo aprofundado dos impactos causados pelas fases construtiva e operacional.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.040. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura.** Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.044. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro, 2009.
- ACV BRASIL. **Avaliação do Ciclo de Vida com SimaPro®.** Apostila de treinamento. 2015. 84 f. Rio de Janeiro, 2015.
- APHA; WEF; AWWA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 22nd ed. Washington D.C.: American Public Health Association, 2012, 1496 p.
- ARAÚJO, R. K. **Dinâmica da contaminação por efluente sanitário em área de campus universitário.** 2013. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- BRILHUIS-MEIJER, E. **Weighting: Applying a Value Judgement to LCA Result.**, 2014. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/weighting-applying-a-value-judgement-to-lca-results>>. Acesso em: 21 ago. 2015.
- BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Water Science and Technology**, v. 35, n. 5, p. 11-17. 1997.
- CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de Vida de produtos – ferramenta gerencial da ISO 14000.** Rio de Janeiro, 1998, 105 p.
- COLLAÇO, A. B. **Uso de pneu “picado” como meio suporte de leitos cultivados para o tratamento de esgoto sanitário oriundo de uma E.T.E. convencional.** 2001. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 01/1986.** Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impactos Ambientais como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, 1986.
- COOPER. P. G.; HUMPHRIES, S.; POUND. A. Design of a hybrid reed bed system to achieve complete nitrification and denitrification of domestic sewage. **Water Science and Technology**, v. 40, p. 283-289, 1999.
- COSTA, S. M. S. P. **Avaliação do potencial de plantas nativas do Brasil no tratamento de esgoto doméstico e efluentes industriais em wetlands construídos.** 2004. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

CURTI, R. **Curso Intensivo de Tecnologia Básica de Concreto**. Apostila de treinamento. 2013. 42 f. Rio de Janeiro, 2013.

DECEZARO, S. T. **Nitrificação e remoção de matéria orgânica carbonácea e sólidos de efluente doméstico em *wetland* construído de fluxo vertical**. 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

FUCHS, V. J.; MIHELICIC, J. R.; GIERKE, J. S. Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse house emissions. **Water Research**, v. 45, p. 2073-2081, 2011.

GODIN, D.; BOUCHARD, C.; VANROLLEGHEM, P. A. LCA of wastewater treatment systems: Introducing a net environmental benefit approach. In: IWA Symposium on systems analysis and integrated assessment, 2011. **Anais...** IWA: Québec, 2011, p. 159-167.

GUTIERREZ, K. G. **Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida**. 2014. 112 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

HOIBYE, L.; CLAUSON-KAAS, J.; WENZEL, H.; LARSEN, H. F.; JACOBSEN, B. N.; DALGAARD, O. Sustainability assessment of advanced wastewater treatment Technologies. **Water Science and Technology**, IWA Publishing, 58.5, p. 963 - 968, 2008.

HOSPIDO, A.; MOREIRA, M. T.; COUTO, M. F.; FEIJOO, G. Environmental Performance of a Municipal Wastewater Treatment Plant. **LCA Case Studies**, v. 9, n. 4, p. 261-271, 2004.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades@**: Rio Grande do Sul. Santa Maria. 2016. Disponível em: < <http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?lang=&codmun=431690&search=|santa-maria> >. Acesso em: 29 jul. 2015.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Adoption and acceptance of the “2013 supplement to the 2006 guidelines: wetlands”. Thirty-seventh session of the IPCC. Batumi, Georgia, 2013.

KADLEC, R.H.; KNIGHT, R.L. **Treatment Wetlands**. CRC Press, Boca Raton, Fl. 893 p. 1996.

KADLEC, R.H.; WALLACE, S. **Treatment Wetlands**. 2 ed. Boca Raton, Florida, EUA, 1016 p., 2009.

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 em

Meio Ambiente, Águas e Saneamento) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

MACHADO, A. P.; URBANO, I.; BRITO, A.; JANKNECHT, P.; RODRÍGUEZ, J. J.; NOGUEIRA, R. Life Cycle Assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities: energy-saving systems versus activated sludge. In: 10th International Conference on wetland systems for water pollution control. **Anais...** IWA, 2006.

MAIA, C. C. Cálculo de materiais para execução de uma parede de alvenaria. 2015. Disponível em <http://docslide.com.br/documents/calculo-de-quantidades-de-materiais-para-execucaao-de-uma-parede-de-alvenaria.html>. Acesso em fevereiro de 2016.

MOTA, F. S. B.; SPERLING, M. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. 2009. PROSAB 5, tema 2. Rio de Janeiro: ABES.

OLYJNYK, D. P. **Avaliação da nitrificação e desnitrificação de esgoto doméstico empregando filtros plantados com macrófitas (wetlands) de fluxos vertical e horizontal – sistemas híbridos**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PELISSARI, C. **Tratamento de efluente proveniente da bovinocultura de leite empregando wetlands construídos de escoamento subsuperficial**. 2013. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

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

PHILIPPI, L. S.; SEZERINO, P. H.; OLIJNYK, D. P.; KOSSATZ, B. **Eficácia dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico e de água para consumo humano utilizando wetlands considerando períodos diferentes de instalação e diferentes substratos e plantas utilizados**. Relatório de atividades. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PHIPPI, L.S.; PELISSARI, C.; FURTADO, D. F. C.; SEZERINO, P. H. Hybrid constructed wetlands used in treatment of domestic wastewater in rural area in south of Brazil – implementation and monitoring of the initial phase of operation. In: International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 12, 2010, Veneza. **Anais...** Veneza: IWA, v.2, p.1444-1449, 2010.

PLANO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO – PLANSAB. **Mais saúde com mais qualidade de vida e cidadania**. Brasília, 2013, 172 p.

ROUX, P.; BOUTIN, C.; RISCH, E.; HÉDUIT, A. Life Cycle environmental Assessment (LCA) of sanitation systems including sewerage: Case of vertical flow constructed wetlands versus activated sludge. In: International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 12, 2010, Veneza. **Anais...** Veneza: IWA, 2010.

SALATI, E.; SALATI, E. F.; SALATI, E. **Utilização de sistemas de wetlands construídas para tratamento de águas**. Instituto Terramax – Consultoria e Projetos Ambientais LTDA, Piracicaba, 2009.

SALATI JR., E.; SALATI, E.; SALATI, E. Wetlands projects developed in Brazil. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 19-25, 1999.

SANI, A.; SCHOLZ, M.; BABATUNDE, A.; WANG, Y. Impact of Water Quality Parameters on the Clogging of Vertical-Flow Constructed Wetlands Treating Urban Wastewater. **Water Air Soil Pollut.**, v. 224, n. 1488, 2013.

SOUZA, D.M.; LAFONTAINE, M.; CHARRON-DOUCET, F.; BENGOA, X.; CHAPPERT, B.; DUARTE, F.; LIMA, L. Comparative Live Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context. **Journal of Cleaner Production**, v. 89, p. 165 – 173, 2015.

SEZERINO, P. H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical**. 2006. 171 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SILVA, C. S. **“Wetlands construídos” de fluxo vertical de meio suporte de solo natural modificado no tratamento de esgoto doméstico**. 2007. 231 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília. 2007

STANDMARK, J.; LEONARDSON, L. Emission of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal. **Ecological Engineering**, v. 25, p. 542-551, 2005.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. Diagnóstico dos serviços de água e esgoto. 2013. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2013>>. Acesso em: 12 set. 2015.

TANNER, C. C. Plants for constructed wetland treatment systems - A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. **Ecological Engineering**, v. 7, p. 59-83, 1996.

TEITER, S.; MANDER, Ü. Emission of N₂O, N₂, CH₄, and CO₂ from constructed wetlands for wastewater treatment and from riparian buffer zones. **Ecological Engineering**, v. 25, p. 528 – 541, 2005.

TCHOBANOGLIOUS, G.; CRITES, R.W. Wastewater reclamation and reuse in small and decentralized wastewater management systems. **Wastewater Reclamation and reuse**, v. 10, 1998. 1480 f.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Constructed Treatment Wetlands**. 2004.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (UFSM). Disponível em: <www.ufsm.br>. Acesso em: 20 jun. 2015.

VERHOEVEN, J. T. A.; MEULEMAN, A. F. M. Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations. **Ecological Engineering**, v. 12, p. 5-12, 1999.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. v. 2. Belo Horizonte, MG. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 1996, 211p.

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment. **Water**. v. 2, p. 530-549, 2010.

VYMAZAL, J. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. **Ecological Engineering**, v. 61, p. 582-592, 2013.

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

WINTER, K. J.; GOETZ, D. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 48, p. 9-14, 2003.

ZANELLA, L. **Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários:wetlands construídos utilizando brita e bambu como suporte**. 2008. 219 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo; Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

ZHAO, L.; ZHU, W.; TONG, W. Clogging processes caused by biofilm growth and organic particle accumulation in lab-scale vertical flow constructed wetlands. **Journal of Environmental Sciences**, v. 21, p. 750–757, 2009.

ZHI, W.; JI, G. Constructed wetlands, 1999-2011: A review of research development, current trends, and future directions. **Science of the Total Environment**, v. 441, p. 19-27, 2012.