

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Bruna Ruschel Corrêa de Oliveira**

**TRATAMENTO DE ESGOTOS:  
PROPOSTA DE PROJETO MAIS SUSTENTÁVEL**

Porto Alegre  
junho 2013



**BRUNA RUSCHEL CORRÊA DE OLIVEIRA**

**TRATAMENTO DE ESGOTOS:  
PROPOSTA DE PROJETO MAIS SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Miguel Aloysio Sattler**

Porto Alegre

junho 2013



**BRUNA RUSCHEL CORRÊA DE OLIVEIRA**

**TRATAMENTO DE ESGOTOS:  
PROPOSTA DE PROJETO MAIS SUSTENTÁVEL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 28 de junho de 2013

Prof. Miguel Aloysio Sattler  
PhD pela Sheffield University, UK  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Luís Carlos Bonin (UFRGS)**  
Mestre pela UFRGS

**Luiz Augusto dos Santos Ercole**  
Mestre pela UFRGS

**Miguel Aloysio Sattler**  
PhD pela Sheffield University, UK



Dedico este trabalho a meus pais, Filipe e Vera, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Miguel Aloysio Sattler, orientador deste trabalho, pela atenção, pelo empréstimo de seus maravilhosos livros, pelo compartilhamento de sua grande sabedoria na área mais importante desses tempos, a sustentabilidade. Gratidão, também, por proporcionar um enorme sorriso no meu rosto toda vez que saía de um encontro.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt pela paciência, competência e dedicação nas correções e orientação deste trabalho proporcionando o desenvolvimento e as entregas de todas as etapas no prazo estabelecido.

Agradeço a toda minha família pelo amor incondicional que me faz sentir essa força que nos move para a nossa evolução humana e espiritual na Terra.

Agradeço ao Felipe, meu namorado, que, com muito amor, me ajudou bastante nos momentos de crise e indecisão. Gratidão por compartilhar essa vida maravilhosa e cheia de ensinamentos.

Agradeço a todos os meus amigos que, com muito carinho, me motivaram, apoiaram e deram bons conselhos para ajudar a atravessar esta grande etapa da vida.



A vida da terra depende da vontade humana.  
A terra será o que os homens nela farão.  
Nós vivemos, desde agora, este momento histórico  
decisivo da evolução terrestre.

*Rudolf Steiner*



## RESUMO

Este trabalho versa sobre uma proposta de projeto mais sustentável para o tratamento de esgoto do Centro de Estudos Regenerativos e Sustentabilidade (Ceres), na cidade de Feliz/RS. Esta proposta visa à integração com a natureza por meio da utilização de ecotecnologias, buscando a sustentabilidade, equilíbrio entre meio ambiente, economia e aspectos sociais, conforme os princípios deste centro. Os sistemas convencionais de tratamentos de esgotos são econômica e energeticamente esbanjadores, além de, diversas vezes, contribuírem para a poluição do meio ambiente com o uso de produtos químicos perigosos. Devido a este fato, foram analisados, neste trabalho, apenas os sistemas de tratamentos de esgotos mais sustentáveis, a partir de uma revisão bibliográfica, considerando, em primeira ordem, o baixo consumo de energia. Aliado a essa vantagem, esses sistemas alternativos permitem o aproveitamento da água e dos nutrientes presentes nos esgotos pelas plantas, garantindo o nível terciário de tratamento (os convencionais apenas chegam ao nível secundário). No início do trabalho, foi realizado um estudo sobre as características e a microbiologia dos esgotos domésticos para um melhor entendimento deste. No capítulo seguinte, foram apresentados os processos de tratamento mais sustentáveis disponíveis na bibliografia técnica pesquisada. Com uma análise sucinta, baseada em quadros de avaliação de aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais, foi realizada a seleção do sistema modular com separação das águas, apresentado como o mais adequado no capítulo seis. Assim, demonstrou-se que a separação das águas negras (provenientes dos vasos sanitários) das águas cinzas (demais águas servidas) permite uma maior eficiência no tratamento de esgotos tanto econômica, como técnica e ambiental. Finalmente, foi desenvolvido o dimensionamento do sistema, conforme estudado na pesquisa bibliográfica.

Palavras-chave: Ceres. Sistemas de Tratamentos de Esgotos mais Sustentáveis.  
Ecotecnologias.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estábulo existente .....	21
Figura 2 – Parte superior da área destinada ao tratamento de esgotos .....	21
Figura 3 – Diagrama esquemático do delineamento da pesquisa .....	25
Figura 4 – Composição dos esgotos sanitários .....	27
Figura 5 – Curva de crescimento microbiano .....	35
Figura 6 – Técnicas de aplicação do esgoto por infiltração lenta ou irrigação .....	43
Figura 7 – Sistema de tratamento por infiltração rápida .....	44
Figura 8 – Sistema de tratamento por escoamento superficial com distribuição por tubos furados.....	45
Figura 9 – Sistema de tratamento por valas de infiltração .....	47
Figura 10 – Sistema de tratamento com sumidouros .....	47
Figura 11 – Sistema de tratamento por valas de filtração .....	48
Figura 12 – Sistema de tratamento por leito de evapotranspiração .....	49
Figura 13 – Sistema de tratamento com terras úmidas .....	51
Figura 14 – Reator anaeróbio com elemento filtrante de aparas de plástico ou de pneus (dimensões em metros) .....	53
Figura 15 – Conjunto de reator anaeróbio, decantador e caixa para mistura dos efluentes .....	54
Figura 16 – Decantador normal de duas câmaras (dimensionado para cinco pessoas, cotas em centímetros) .....	55
Figura 17 – Esquema de um banheiro seco com separação de urina .....	58
Figura 18 – Vaso sanitário separador de urina .....	58
Figura 19 – Sistema com recipientes móveis .....	59
Figura 20 – Sistema carrossel .....	59
Figura 21 – Sistema com duas câmaras tipo Bason .....	60
Figura 22 – Assentos utilizados alternadamente .....	60
Figura 23 – Biodigestor contínuo vertical tipo chinês .....	61
Figura 24 – Lagoa facultativa .....	64
Figura 25 – Sistema de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas .....	65
Figura 26 – Sistema de tratamento por lagoa com jacinto d'água .....	66
Figura 27 – Sistema de tratamento com lagoas de purificação pelas raízes de plantas aquáticas .....	66
Figura 28 – Decantador (dimensões em metro) .....	77
Figura 29 – Reator anaeróbio e decantador (dimensões em metro) .....	82

Figura 30 – Esquema da proposta de projeto de tratamento de esgotos completa (dimensões em metro) .....	86
Figura 31 – Degraus do LET (dimensões em metro) .....	87

## **LISTA DE SIGLAS**

Ceres – Centro de Estudos Regenerativos e Sustentabilidade

COT – Carbono Orgânico Total

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DBO<sub>5</sub> – Demanda Bioquímica de Oxigênio em Cinco Dias

DBOu – Demanda Bioquímica Última de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

LET – Leito de Evapotranspiração

LETI – Leito de Evapotranspiração e Infiltração

NBR – Norma Brasileira

NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl

pH – Potencial Hidrogeniônico

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2 DIRETIZES DA PESQUISA .....</b>	<b>23</b>
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	23
2.2 OBJETIVOS .....	23
<b>2.2.1 Objetivo Principal .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.2 Objetivo Secundário .....</b>	<b>23</b>
2.3 PRESSUPOSTO .....	24
2.4 PREMISSAS .....	24
2.5 DELIMITAÇÕES .....	24
2.6 LIMITAÇÕES .....	24
2.7 DELINEAMENTO .....	24
<b>3 CARACTERÍSTICAS DOS ESGOTOS DOMÉSTICOS .....</b>	<b>27</b>
3.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS .....	27
3.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS .....	28
<b>3.2.1 Sólidos .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2 Matéria Orgânica .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3 Nitrogênio e Fósforo .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.4 pH e Alcalinidade .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.5 Cloretos .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.6 Óleos e Graxas .....</b>	<b>31</b>
3.3 PRINCIPAIS MICROORGANISMOS PRESENTES NOS ESGOTOS .....	31
<b>4 MICROBIOLOGIA DO TRATAMENTO DOS ESGOTOS .....</b>	<b>33</b>
4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SERES VIVOS .....	33
4.2 CRESCIMENTO BACTERIANO .....	34
4.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	36
4.4 DIGESTÃO AERÓBIA .....	37
<b>5 ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO .....</b>	<b>39</b>
5.1 NÍVEIS DE TRATAMENTO .....	39
<b>5.1.1 Tratamento Preliminar .....</b>	<b>39</b>
<b>5.1.2 Tratamento Primário .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1.3 Tratamento Secundário .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1.4 Tratamento Terciário .....</b>	<b>41</b>
5.2 SISTEMAS DE TRATAMENTO MAIS SUSTENTÁVEIS DISPONÍVEIS .....	41

<b>5.2.1 Disposição Controlada no Solo .....</b>	<b>41</b>
5.2.1.1 Infiltração lenta ou irrigação .....	42
5.2.1.2 Infiltração rápida .....	44
5.2.1.3 Escoamento superficial .....	44
5.2.1.4 Infiltração subsuperficial .....	45
5.2.1.4.1 Valas de infiltração .....	46
5.2.1.4.2 Sumidouros .....	47
5.2.1.4.3 Valas de filtração ou filtros de areia .....	48
5.2.1.4.4 Leito de evapotranspiração .....	48
5.2.1.4.5 Terras úmidas de fluxo subsuperficial (banhados, pântanos, wetlands) .....	50
<b>5.2.2 Tratamento de Esgotos com Separação das Águas .....</b>	<b>51</b>
5.2.2.1 Sistema modular com separação das águas .....	52
5.2.2.2 Privadas secas .....	57
5.2.2.2.1 Sistema com recipientes móveis .....	58
5.2.2.2.2 Sistema carousel .....	59
5.2.2.2.3 Sistema com duas câmaras .....	59
5.2.2.3 Biodigestores .....	60
<b>5.2.3 Lagoas de Estabilização .....</b>	<b>62</b>
5.2.3.1 Lagoas facultativas .....	62
5.2.3.2 Sistema de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas .....	64
5.2.3.3 Lagoas com plantas aquáticas .....	65
5.2.3.4 Lagoas de maturação .....	67
<b>6 ANÁLISE E SELEÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTOS.....</b>	<b>69</b>
6.1 ANÁLISE DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS .....	69
6.2 SELEÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTOS .....	72
<b>7 DIMENSIONAMENTO .....</b>	<b>75</b>
7.1 DECANTADOR .....	75
7.2 REATOR ANAERÓBIO BICOMPARTIMENTADO .....	77
<b>7.2.1 Decanto-digestor .....</b>	<b>77</b>
<b>7.2.2 Filtro Anaeróbio .....</b>	<b>81</b>
7.3 LEITO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E INFILTRAÇÃO .....	83
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>89</b>
REFERÊNCIAS .....	91

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a preocupação com o meio ambiente está cada vez mais presente no ramo da Engenharia Civil devido ao fato deste ter grande responsabilidade com a natureza, pois tem bastante poder de transformá-la. A quantidade de energia gasta na construção civil é muito grande em todas as suas etapas, isto é, na extração de matérias primas, na produção dos diferentes materiais, em seu transporte e na execução das construções. Diminuir este consumo de energia é essencial, pois além do fato de não ser fácil a geração de energia de uma forma que não interfira muito no meio ambiente, as principais fontes de energia utilizadas atualmente são de origem fóssil (carvão, gás natural e petróleo). Essas fontes se esgotarão em poucas décadas se o consumo atual persistir. Além do fato de que a queima destes combustíveis fósseis liberam vários gases responsáveis pela poluição atmosférica, contaminação dos recursos hídricos, entre outros fatores nocivos ao meio ambiente.

Conforme Marques (1999), estudos de ecologia de ecossistemas têm mostrado que as atividades humanas e a natureza podem ser harmonizadas, utilizando-se ecotecnologias. Estas são manipulações ambientais realizadas por seres humanos na auto-organização dos ecossistemas as quais aumentam a eficiência dos sistemas. São necessárias pequenas quantidades de energia para o controle destas, sendo as principais fontes de energia as naturais.

Assim, os processos de tratamento de esgoto, por exemplo, acabam fazendo parte do ecossistema, ou seja, são as trocas de energia da natureza que o realizam. Contudo, a maioria dos sistemas de tratamento de esgoto que existe hoje consome muita energia, exige muita manutenção, custa muito caro e não tem o devido cuidado com a natureza. Para Todd e Todd (c1994, p. 176, tradução nossa) as ecotecnologias podem ser interpretadas como máquinas vivas:

Econômica e energeticamente, máquinas vivas fazem enorme sentido. Elas são competitivas no custo em algumas áreas de plantações de alimentos e em purificação de esgotos concentrados. Neste, máquinas vivas evitam químicos perigosos, e são livres de poluição na operação, elas atraem ambientalistas. O maior impedimento da adoção de tecnologias vivas serem difundidas surge, ironicamente, do mesmo fenômeno que elas estão destinadas a resolver; o estranhamento pelas culturas modernas do mundo natural. A natureza está invisível para muitas pessoas. Nós esperamos que a estética e as qualidades emocionais das máquinas vivas unidas com

a funcionalidade e segurança econômica acelere a aceitação delas. Elas podem ser desenhadas para serem bonitas – evocativas para a profunda harmonia encontrada na natureza.

A água doce é um recurso natural com o qual também se deve ter o maior cuidado, pois é vital para os seres vivos e há escassez desta. Além de apenas representar 2,5% da água do Planeta, somente 0,3% é de fácil acesso em rios e lagos e, ainda, apresenta má distribuição pela Terra. Ainda assim, está sendo negligenciada por muitas atividades humanas que a poluem, reduzindo ainda mais a disponibilidade de água de qualidade para consumo.

Em muitos locais do mundo, não há cuidado nos despejos de esgotos. Um exemplo disto é o caso de Porto Alegre, onde 73% do esgoto é despejado no rio Guaíba sem tratamento. E, ainda, a captação de água para consumo se faz neste mesmo manancial, numa região poluída por estes resíduos. Combinado a isto, hoje em dia, utiliza-se muita água potável para fins que não a exigem.

A reutilização da água pós-tratamento de esgotos para irrigação, lavagem de carros, entre outras atividades é uma ação que deve ser reconhecida e estimulada. Utilizando-se tratamentos alternativos, além de pequenas comunidades tratarem o próprio esgoto localmente com técnicas que as aproximam da natureza e são de baixo custo, pode-se ter mais controle das águas utilizadas em suas atividades. Com isso, se consegue encontrar um meio de diminuir a quantidade de água potável a ser consumida.

Um sistema que analisa e propõe soluções, não só para todas essas questões apresentadas até agora, mas, também, para aspectos sociais, econômicos, entre outros, é a Permacultura. De acordo com Mars (2008), esta foi criada na década de 1970 pelo Bill Mollinson e o David Holmgren, na Austrália, com uma idéia de agricultura permanente, focada no crescimento e desenvolvimento de alimentos e grãos perenes. Após, foi se desenvolvendo e sendo reconhecida como cultura permanente, envolvendo outros aspectos das atividades humanas. Atualmente, é pensada além destas linhas, incorporando todos os aspectos dos seres humanos e seus assentamentos. É um sistema de *design* que busca integrar todos os componentes do ecossistema através de uma abordagem holística para um viver sustentável e prático, com a ética de cuidado com as pessoas, cuidado com o ambiente e atenção aos limites e redistribuição dos excedentes.

Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar um projeto de tratamento de esgotos mais sustentável para o alojamento do Centro de Estudos Regenerativos e Sustentabilidade (Ceres), na cidade de Feliz/RS. A construção, atualmente, é um estábulo (figuras 1 e 2), mas este será transformado em alojamento, com a reforma que está planejada. Esta proposta visa à integração com a natureza por meio da utilização de ecotecnologias, buscando a sustentabilidade, equilíbrio entre meio ambiente, economia e aspectos sociais. Baseado nestes princípios, o Ceres tem como objetivos:

- a) educação, demonstração e pesquisa;
- b) disseminação de alternativas mais sustentáveis;
- c) aplicação prática de pesquisas e de técnicas ambientalmente sadias;
- d) formar e capacitar profissionais regionais;
- e) incentivar a diversificação da economia regional;
- f) desenvolvimento da cidadania e da preservação ambiental;
- g) preservar e regenerar a diversidade do ecossistema natural;
- h) fortalecer as redes que lutam pela conscientização ecológica.

Figura 1 – Estábulo existente



(fonte: foto da autora)

Figura 2 – Parte superior da área destinada ao tratamento de esgotos



(fonte: foto da autora)

No próximo capítulo, estão descritas as diretrizes da pesquisa para elaboração deste trabalho, contendo a questão de pesquisa, os objetivos, o pressuposto, as premissas, a delimitação, a limitação e o delineamento. Após, estão os capítulos três e quatro, que descrevem as características e a microbiologia dos esgotos domésticos, respectivamente, para um melhor entendimento do trabalho. As alternativas de tratamento de esgotos mais sustentáveis

disponíveis encontram-se no capítulo cinco. Em seguida, de forma sucinta, estão a análise e a seleção do sistema mais adequado, e, no sétimo capítulo, o dimensionamento deste.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

Para a elaboração deste trabalho foram adotadas as seguintes diretrizes.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: definido o método mais adequado para a resolução do tratamento de esgoto para o alojamento do Centro de Estudos Regenerativos e Sustentabilidade (Ceres), na cidade de Feliz, qual é a proposta de projeto que pode ser apresentada para sua implantação?

### **2.2 OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

Este trabalho tem como objetivo principal a apresentação de uma proposta de projeto mais sustentável para o tratamento de esgoto para o alojamento do Ceres, na cidade de Feliz.

#### **2.2.2 Objetivo Secundário**

O objetivo secundário deste trabalho é a análise crítica dos métodos de tratamento de esgoto mais sustentáveis, indicando suas vantagens e desvantagens, para a seleção do processo mais adequado para o alojamento.

## 2.3 PRESSUPOSTO

Este trabalho tem como pressuposto que, para a realização dos cálculos de dimensionamento, considerou-se a integridade dos métodos estudados na bibliografia.

## 2.4 PREMISSAS

O trabalho de pesquisa sucede do fato de que a realização de um projeto mais sustentável para o tratamento de esgoto do alojamento do Ceres é o mais adequado, para se alinhar aos princípios que orientam a implementação deste. As soluções mais adotadas, hoje em dia, para tratamento de esgotos, são econômica e energeticamente esbanjadoras, além de muitas vezes utilizarem produtos químicos perigosos, que contribuem para a poluição do meio ambiente.

## 2.5 DELIMITAÇÃO

A delimitação desse trabalho é o espaço geográfico do tratamento de esgoto proposto, que se situa no Ceres, o qual está localizado na cidade de Feliz.

## 2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho tem como limitações o fato do projeto ser somente de caráter teórico, sem experimentos próprios, e que a proposta foi realizada somente para a construção já existente (estábulo), supondo que a reforma futura para transformá-lo em alojamento já tenha sido implantada. Além disto, a etapa de projeto do leito de evapotranspiração foi prejudicada pelo fato de que não há levantamento topográfico do terreno.

## 2.7 DELINEAMENTO

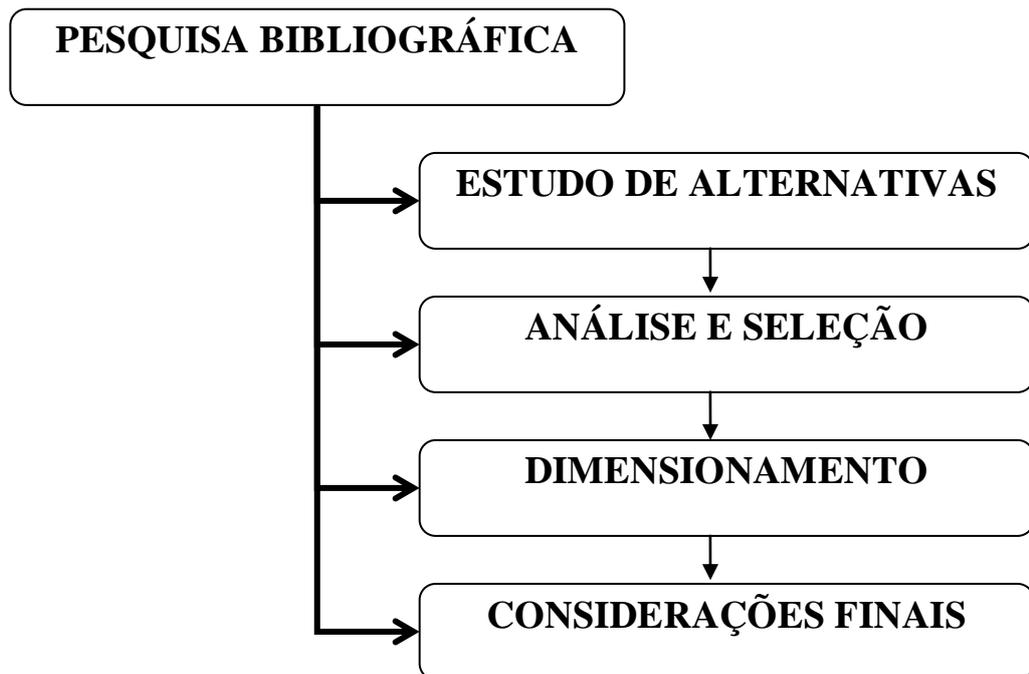
O delineamento do trabalho abrangeu as seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica: foi realizada durante todas as fases do trabalho, buscando o seu suporte e fundamentação. Para tanto, foi feito o uso de bibliografia técnica;

- b) estudo de alternativas de tratamento de esgotos: com base na pesquisa bibliográfica foi realizada uma análise das tecnologias mais sustentáveis disponíveis;
- c) análise e seleção do processo de tratamento de esgotos: após o estudo das alternativas de tratamento de esgotos, nesta etapa, são analisadas, e as diretrizes, para a seleção do sistema de tratamento mais adequado, para o caso em questão, são definidas;
- d) dimensionamento: foi realizado o dimensionamento do sistema escolhido para o Ceres, segundo os cálculos existentes na bibliografia técnica;
- e) considerações finais: análise crítica das referências estudadas para a realização do trabalho.

A sequência das etapas pode ser visualizada pelo diagrama esquematizado da figura 3:

Figura 3 – Diagrama esquemático do delineamento da pesquisa



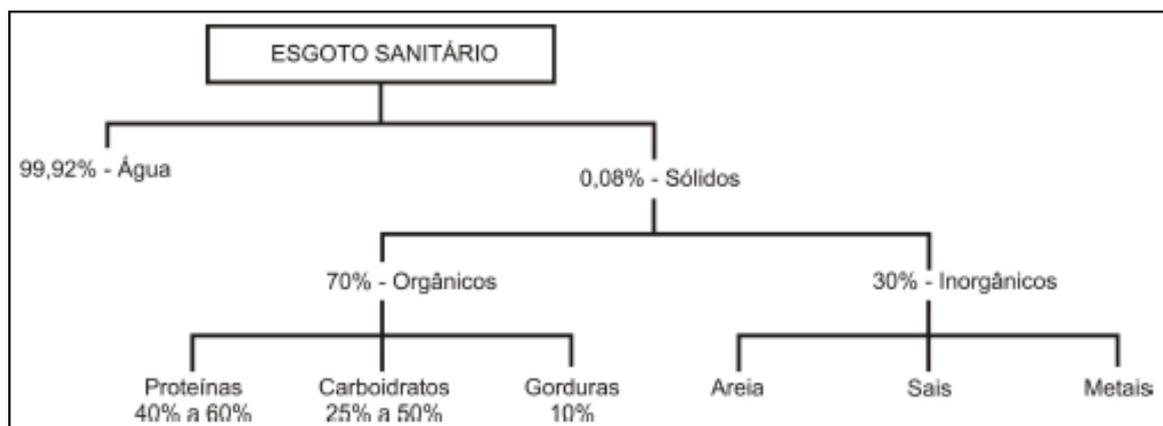
(fonte: elaborada pela autora)



### 3 CARACTERÍSTICAS DOS ESGOTOS DOMÉSTICOS

De acordo com Von Sperling (1995), os esgotos domésticos são constituídos, como mostra a figura 4, de aproximadamente 99,9% de água e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, e de microorganismos. Estes sólidos são os responsáveis pela contaminação das águas e, portanto, a razão para se tratar os esgotos. A qualidade dos esgotos é definida pela utilização de parâmetros indiretos divididos em três categorias: físicos, químicos e biológicos, conforme apresentado a seguir.

Figura 4 – Composição dos esgotos sanitários



(fonte: UEHARA; VIDAL, 1989<sup>1</sup> apud ERCOLE, 2003, p. 55)

#### 3.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Conforme Qasim<sup>2</sup> (1985 apud VON SPERLING, 1995), as principais características físicas dos esgotos domésticos são:

- a) temperatura,
  - ligeiramente superior à da água de abastecimento;

<sup>1</sup> UEHARA, M. Y.; VIDAL, W. L. **Operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas**. São Paulo: CETESB, 1989. Séries Manuais.

<sup>2</sup> QASIM, S. R. **Wastewater treatment plants: planning, design and operation**. New York: Holt, Rinehart e Winston, 1985.

- variação conforme as estações do ano, sendo mais estável que a temperatura do ar;
  - influência na atividade microbiana, na solubilidade dos gases e na viscosidade do líquido;
- b) cor,
- esgoto fresco é ligeiramente cinza;
  - esgoto séptico é cinza escuro ou preto;
- c) odor,
- esgoto fresco tem odor oleoso, relativamente desagradável;
  - esgoto séptico tem odor desagradável, devido ao gás sulfídrico e a outros produtos da decomposição;
  - despejos industriais têm odores característicos;
- d) turbidez,
- causada por uma grande variedade de sólidos em suspensão;
  - esgotos mais frescos ou mais concentrados geralmente apresentam maior turbidez.

## 3.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

As principais características químicas dos esgotos domésticos são apresentadas a seguir.

### 3.2.1 Sólidos

Segundo Metcalf & Eddy Inc.<sup>3</sup> (1991 apud VON SPERLING, 1995), os sólidos totais podem ser orgânicos e inorgânicos. Classificam-se em sólidos:

- a) suspensos: é a fração dos sólidos totais que são filtráveis. Podem ser sólidos suspensos fixos, que são componentes minerais não incineráveis e inertes, e sólidos suspensos voláteis, que são os componentes orgânicos;
- b) dissolvidos: é a fração dos sólidos totais que não são filtráveis. Compõem-se dos sólidos dissolvidos fixos, que são os componentes minerais, e dos sólidos dissolvidos voláteis, que são os componentes orgânicos;
- c) sedimentáveis: é a fração dos sólidos totais que sedimenta em 1 hora no cone Imhoff, que é uma indicação aproximada da sedimentação em um tanque de decantação.

---

<sup>3</sup> METCALF & EDDY Inc. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

### 3.2.2 Matéria Orgânica

De acordo com Metcalf & Eddy Inc.<sup>4</sup> (1991 apud VON SPERLING, 1995), a matéria orgânica é uma mistura heterogênea de diversos compostos orgânicos, sendo seus principais componentes as proteínas (~40%), os carboidratos (~25 a ~50%) e os lipídios (~10%). Em menor quantidade encontra-se a uréia, surfactantes, fenóis, pesticidas e outros. Pode ser determinada indiretamente, através da DBO<sub>5</sub>, DQO ou DBO<sub>u</sub>, ou diretamente, através do COT, sendo:

- a) DBO<sub>5</sub> – Demanda Bioquímica de Oxigênio: é a quantidade de oxigênio consumida, após cinco dias, por microorganismos, para estabilizar a matéria orgânica carbonácea, a 20°C;
- b) DQO – Demanda Química de Oxigênio: é a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar quimicamente a matéria orgânica carbonácea. Obtida através de um forte oxidante (dicromato de potássio) em meio ácido;
- c) DBO<sub>u</sub> – Demanda Bioquímica Última de Oxigênio: corresponde ao consumo total de oxigênio até o tempo em que este se torne desprezível. Para esgotos domésticos, pode-se considerar que, aos vinte dias de teste, a estabilização da matéria orgânica pelos microorganismos esteja praticamente completa;
- d) COT – Carbono Orgânico Total: é um teste instrumental que mede todo o carbono liberado na forma de gás carbônico.

### 3.2.3 Nitrogênio e Fósforo

O nitrogênio e o fósforo são nutrientes indispensáveis para o crescimento dos microorganismos no tratamento biológico. Em certas condições, podem conduzir a fenômenos de eutrofização (crescimento excessivo de algas) de lagos e represas, sendo, assim, componentes de grande importância em termos da geração e do próprio controle da poluição das águas. Eles podem causar, também, toxicidade aos peixes (amônia livre), doença em recém-nascidos (nitratos) e poluição da água subterrânea (VON SPERLING et al., 2009).

Segundo Von Sperling (1995), nos esgotos domésticos brutos, as formas predominantes do nitrogênio são o orgânico e a amônia, determinados em laboratório pelo método Kjeldahl, constituindo o assim denominado Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). O nitrogênio total inclui:

- a) nitrogênio orgânico: na forma de proteínas, aminoácidos e uréia;

---

<sup>4</sup> METCALF & EDDY Inc. **Wastewater engineering**: treatment, disposal and reuse. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

- b) amônia: produzida como primeiro estágio da decomposição do nitrogênio orgânico;
- c) nitrito: estágio intermediário da oxidação da amônia;
- d) nitrato: produto final da oxidação da amônia.

O fósforo total no esgoto doméstico apresenta-se como fosfatos, nas formas a seguir (INTERNATIONAL ASSOCIATION ON WATER QUALITY<sup>5</sup>, 1995 apud VON SPERLING et al., 2009):

- a) inorgânica (polifosfatos e ortofosfatos): origem principal nos detergentes e outros produtos químicos domésticos;
- b) orgânica (ligada a compostos orgânicos): origem fisiológica.

### 3.2.4 pH e Alcalinidade

De acordo com Metcalf & Eddy Inc.<sup>6</sup> (1991 apud VON SPERLING, 1995), o pH indica as características ácidas ou básicas do esgoto. Uma solução é neutra em pH sete. Os processos de oxidação biológica normalmente tendem a reduzi-lo. Já, a alcalinidade indica a capacidade tampão do meio (resistência às variações do pH). Esta é apresentada devido à presença de bicarbonato, carbonato e íon hidroxila (OH<sup>-</sup>).

### 3.2.5 Cloretos

Conforme Metcalf & Eddy Inc.<sup>7</sup> (1991 apud VON SPERLING, 1995), os cloretos são provenientes da água de abastecimento e dos dejetos humanos. A faixa de contribuição per capita está entre 4 e 8 g/hab·dia.

---

<sup>5</sup> INTERNATIONAL ASSOCIATION ON WATER QUALITY. **Activated sludge model**. [S. l.], 1995. IAWQ Scientific and Technical Reports n.2.

<sup>6</sup> METCALF & EDDY Inc. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

<sup>7</sup> op. cit.

### 3.2.6 Óleos e Graxas

Óleos e graxas são as frações da matéria orgânica solúveis em hexanos. Nos esgotos domésticos, são provenientes da utilização de óleos e gorduras nas comidas (METCALF & EDDY Inc.<sup>8</sup>, 1991 apud VON SPERLING, 1995).

### 3.3 PRINCIPAIS MICROORGANISMOS PRESENTES NOS ESGOTOS

Segundo Metcalf & Eddy Inc.<sup>9</sup> (1991 apud VON SPERLING, 1995), os principais microorganismos presentes nos esgotos são:

- a) bactérias: são organismos protistas unicelulares de várias formas e tamanhos. São os principais responsáveis pela estabilização da matéria orgânica, entretanto, algumas bactérias são patogênicas, causando principalmente doenças intestinais;
- b) fungos: são organismos aeróbios, multicelulares, não fotossintéticos, heterotróficos, os quais também são de grande importância na decomposição da matéria orgânica. Podem crescer em condições de baixo pH;
- c) protozoários: são organismos unicelulares sem parede celular, sendo a maioria aeróbia ou facultativa. Alimentam-se de bactérias, algas e outros microorganismos, portanto, essenciais para a manutenção de um equilíbrio entre os diversos grupos no tratamento biológico. Alguns são patogênicos;
- d) vírus: são organismos parasitas, formados pela associação de material genético e uma carapaça proteica. São causadores de doenças e podem ser de difícil remoção no tratamento da água ou do esgoto;
- e) helmintos: são animais superiores. Ovos de helmintos presentes nos esgotos podem causar doenças.

A detecção de agentes patogênicos, através de exames laboratoriais numa amostra de água, é muito difícil devido as suas baixas concentrações. Isto se deve ao fato de que apenas uma determinada faixa da população apresenta doenças de veiculação hídrica. Os patogênicos nas fezes destes podem não ser muito significantes, e, após o lançamento no corpo receptor, ainda há uma grande diluição do despejo contaminado. Então, utilizam-se organismos indicadores de contaminação fecal, os quais não são patogênicos, mas dão uma satisfatória indicação de

---

<sup>8</sup> METCALF & EDDY Inc. **Wastewater engineering**: treatment, disposal and reuse. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

<sup>9</sup> op. cit.

contaminação da água. Os principais indicadores são os coliformes totais, coliformes fecais e streptococos (VON SPERLING, 1995).

## 4 MICROBIOLOGIA DO TRATAMENTO DOS ESGOTOS

O conhecimento da microbiologia, ou seja, da biologia que trata dos microorganismos, é de grande importância devido ao fato de que alguns destes, principalmente bactérias, protozoários, fungos, algas e vermes, são fundamentais no processo de tratamento biológico dos esgotos. A principal função de um sistema de tratamento de esgotos é a remoção da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e, neste mecanismo, as bactérias são os seus principais agentes. Além de desempenharem um importante papel na transformação da matéria orgânica, estas possuem a propriedade de se aglomerar em unidades estruturais, como flocos, biofilmes ou grânulos (VON SPERLING<sup>10</sup>, 1996 apud ERCOLE, 2003).

### 4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SERES VIVOS

De acordo com Vazzolér et al.<sup>11</sup> (1989 apud ERCOLE, 2003), os seres vivos são classificados como autotróficos e heterotróficos conforme as suas necessidades nutricionais e energéticas. Contudo, essa classificação é bastante simples e insuficiente para explicar a variedade de caminhos nutricionais que os organismos utilizam. Com base em dois parâmetros importantes, isto é, na natureza da fonte energética e na fonte principal de carbono, é possível reunir os microrganismos em quatro categorias nutricionais bem distintas:

- a) fotoautotróficos: servem-se da luz como principal fonte energética e de CO<sub>2</sub> como principal fonte de carbono. São exemplos dessa categoria,
  - os organismos fotossintéticos;
  - os vegetais superiores;
  - as algas;
  - algumas bactérias ditas fotossintetizantes;
  - certos protozoários;

---

<sup>10</sup> VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: princípios básicos do tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 1996. v. 2.

<sup>11</sup> VAZZOLÉR, R. F.; GARCIA, M. A. R.; GARCIA JÚNIOR, A. D. G.; CONCEIÇÃO NETO, J.. **Microbiologia de lodos ativados**. São Paulo: CETESB, 1989. Séries Manuais.

- b) fotoheterotróficos: servem-se da luz como principal fonte energética e de um composto orgânico como principal fonte de carbono. Nesta categoria estão incluídas as bactérias púrpuras e as verdes;
- c) quimioautotróficos: são os que utilizam uma fonte de energia química e  $\text{CO}_2$  como principal fonte de carbono. A energia é obtida pela oxidação de compostos inorgânicos reduzidos, tais como  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ; formas reduzidas do S ( $\text{H}_2\text{S}$ , S,  $\text{S}_2\text{O}_3$ ) e compostos ferrosos. Somente bactérias pertencem a essa categoria nutricional;
- d) quimioheterotróficos: são os que utilizam uma fonte de energia química e um composto orgânico como principal fonte de carbono. Nesta classe, tanto a fonte de carbono quanto a de energia podem ser derivadas do metabolismo de uma substância orgânica simples. Incluem-se entre os quimioheterotróficos,
  - todos os animais metazoários;
  - protozoários;
  - fungos;
  - a grande maioria das bactérias.

## 4.2 CRESCIMENTO BACTERIANO

Para Vazzolér et al.<sup>12</sup> (1989 apud ERCOLE, 2003), o crescimento dos microorganismos, em culturas puras, pode ser observado segundo o modelo da curva de crescimento descrita por Monod, reproduzida na figura 5. Esta curva apresenta as seguintes fases:

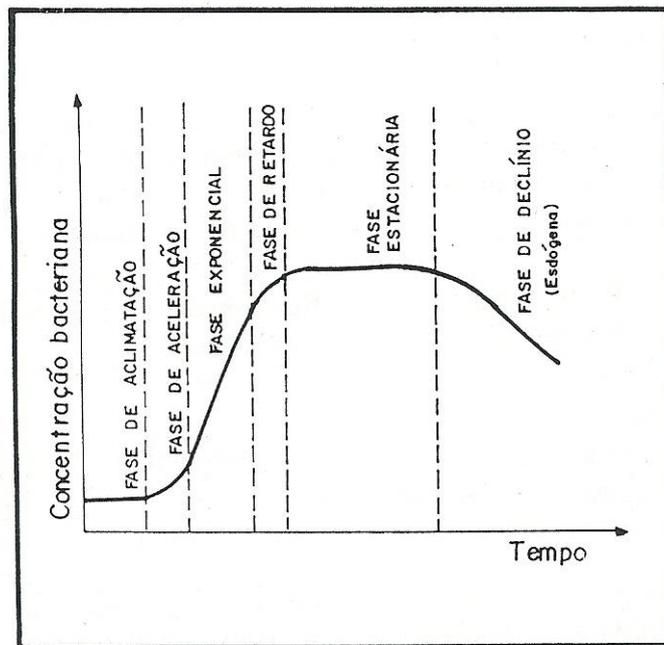
- a) lag ou de aclimação: os microorganismos elaboram as enzimas necessárias ao consumo dos substratos. A velocidade de crescimento é nula;
- b) de aceleração: com o consumo dos substratos, inicia-se o crescimento microbiano. A velocidade de crescimento aumenta com o tempo;
- c) log ou exponencial: frente às condições adequadas de vida (substrato abundante, baixa concentração de metabólitos tóxicos, etc.), os microorganismos crescem com velocidade máxima, que pode ser representada por uma função exponencial;
- d) de desaceleração: a velocidade de crescimento começa a diminuir, pois o substrato disponível começa a se tornar escasso e já existe acúmulo ponderável de excretas tóxicas;
- e) estacionária: com o fim dos substratos e o acúmulo de substâncias tóxicas em níveis incompatíveis com o desenvolvimento microbiano, a velocidade volta a ser nula;

---

<sup>12</sup> VAZZOLÉR, R. F.; GARCIA, M. A. R.; GARCIA JÚNIOR, A. D. G.; CONCEIÇÃO NETO, J. **Microbiologia de lodos ativados**. São Paulo: CETESB, 1989. Séries Manuais.

- f) de declínio: ocorre a diminuição do número de microorganismos, causada pela morte e lise (fragmentação enzimática das moléculas orgânicas cujas partes se tornam solúveis em água).

Figura 5 – Curva de crescimento microbiano



(fonte: VAZZOLÉR et al.<sup>13</sup>, 1989 apud ERCOLE, 2003, p. 62)

Segundo Foresti et al. (1999), existem dois mecanismos para o metabolismo bacteriano, que são o anabolismo e o catabolismo. No primeiro, as bactérias heterótrofas usam o material orgânico como fonte material para a síntese de material celular, o que resulta no aumento da massa bacteriana. No segundo, o material orgânico é usado como fonte de energia por meio de sua conversão em produtos estáveis, liberando energia, parte da qual é usada pelas bactérias no anabolismo. Como as bactérias heterótrofas tem ação bioquímica diferente em ambientes aeróbios (com presença de oxigênio) e anaeróbios (sem presença de oxigênio), os produtos catabólicos também o são:

- a) aeróbio: o material orgânico é mineralizado pelo oxidante para produtos inorgânicos, principalmente dióxido de carbono e água;

<sup>13</sup> VAZZOLÉR, R. F.; GARCIA, M. A. R.; GARCIA JÚNIOR, A. D. G.; CONCEIÇÃO NETO, J. **Microbiologia de lodos ativados**. São Paulo: CETESB, 1989. Séries Manuais.

- b) anaeróbio: o material não se mineraliza, mas sofre transformações por fermentações. Entre seus produtos finais tem o metano e o dióxido de carbono, formando uma fase gasosa, o biogás.

Com uma maior concentração de substrato (alimento disponível), haverá um crescimento no número de bactérias, e, quanto maior a concentração de biomassa, mais substrato é utilizado (mais DBO é removida). Esta consideração é de grande importância no tratamento de esgotos, pois se pode projetar sistemas que operam com alto ou baixo fornecimento de matéria orgânica para as bactérias (VON SPERLING<sup>14</sup>, 1996 apud ERCOLE, 2003).

### 4.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA

De acordo com Foresti et al. (1999), a digestão anaeróbia é composta por diferentes etapas, descritas a seguir. Cada uma tem sua população bacteriana específica.

Na **hidrólise**, o material orgânico particulado é convertido em compostos dissolvidos de menor peso molecular com interferência das exoenzimas, as quais são excretas das bactérias fermentativas. As proteínas são degradadas para formar os aminoácidos, os carboidratos se transformam em açúcares solúveis e os lipídios são convertidos em ácidos graxos de longa cadeia de carbono e glicerina. Em muitos casos, na prática, a velocidade da conversão do material orgânico complexo para biogás é limitada pela velocidade da hidrólise (FORESTI et al., 1999).

Segundo Foresti et al. (1999), as bactérias fermentativas absorvem os compostos liquefeitos gerados na hidrólise, e, após a **acidogênese** (segunda etapa), estes são excretados como substâncias orgânicas simples, tais como:

- a) ácidos graxos voláteis de cadeia curta;
- b) álcoois;
- c) ácido lático;
- d) compostos minerais, como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S.

A maioria das bactérias que fazem a fermentação acidogênica é anaeróbia obrigatória, entretanto algumas são facultativas e podem metabolizar material orgânico por via oxidativa.

---

<sup>14</sup> VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: princípios básicos do tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 1996. v. 2.

Assim, estas retiram o eventual oxigênio dissolvido, que pode ser tóxico para as bactérias metanogênicas, sendo de grande importância para o sistema de tratamento anaeróbio de esgoto (FORESTI et al., 1999).

Na **acetogênese**, os produtos da etapa anterior são convertidos em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Estes são os compostos que formam os substratos para a produção de metano. Aproximadamente 70% da DQO digerida é convertida em ácido acético, e o restante se concentra no hidrogênio ou no dióxido de carbono formado, dependendo do estado de oxidação do material orgânico a ser digerido (FORESTI et al., 1999).

Finalmente, a **metanogênese** é a etapa em que ocorre a redução do ácido acético e do dióxido de carbono em metano. As bactérias responsáveis por estas reduções são as acetotróficas e as hidrogenotróficas, respectivamente. As metanogênicas acetotróficas geralmente limitam a velocidade de transformação de material orgânico complexo, pois tem um crescimento mais lento (FORESTI et al., 1999).

Num reator anaeróbio pode haver a presença de nitrato e sulfato, os quais são oxidantes alternativos, que permitem o desenvolvimento de bactérias que usam o catabolismo oxidativo. O nitrato pode ser reduzido para nitrogênio molecular, em processo denominado desnitrificação, e o sulfato para sulfeto (FORESTI et al., 1999).

De acordo com Kato et al. (1999), o próprio gás gerado em reatores, durante o processo de digestão anaeróbia, desempenha um papel importante na agitação da mistura, durante seu movimento ascensional. Contudo, depende da concentração do esgoto ou da carga orgânica aplicada, funcionando principalmente no tratamento de esgotos com alta concentração orgânica.

Segundo Ercole (2003), o produto final da conversão de matéria orgânica na digestão anaeróbia pode ser representada, de forma geral e simplificada, pela equação 1:



#### 4.4 DIGESTÃO AERÓBIA

A digestão aeróbia é realizada por bactérias que necessitam de oxigênio para estabilizar a matéria orgânica. Conforme Von Sperling (1995), a oxidação desta matéria orgânica, devido à respiração, principalmente, das bactérias heterotróficas aeróbias, é o principal fator de consumo de oxigênio. Estes organismos decompositores convertem a matéria orgânica em compostos simples e inertes (água e gás carbônico), e, enquanto houver matéria orgânica e oxigênio no meio, eles continuam a crescer e se reproduzir. A estabilização da matéria orgânica pode ser representada, de forma simplificada, pela equação 2:



De acordo com Von Sperling<sup>15</sup> (1996 apud ERCOLE, 2003), a digestão aeróbia necessita de menos área, por utilizar equipamentos mais compactos que a anaeróbia, porém, produz de 30 a 40% a mais de lodo. Segundo Foresti et al. (1999), os processos aeróbios requerem grandes custos de execução e de operação devido ao elevado consumo de energia elétrica. Enquanto os anaeróbios não consomem energia elétrica, pois não necessitam de equipamentos eletromecânicos e requerem construção e operação simples.

---

<sup>15</sup> VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: princípios básicos do tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 1996. v. 2.

## **5 ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Para se entender melhor as etapas dos sistemas de tratamento de esgotos e suas funções, a primeira parte do capítulo mostra os níveis de tratamento do processo. Logo após, são descritas as tecnologias mais sustentáveis para o tratamento e disposição local de esgotos domésticos, considerando, em primeira ordem, o baixo consumo de energia.

### **5.1 NÍVEIS DE TRATAMENTO**

Os sistemas de tratamento de esgoto são divididos em etapas. Cada uma delas tem a tarefa de eliminar um ou mais tipos de poluentes. Para se determinar de forma organizada estas diferentes etapas, de forma a adequar o lançamento a uma qualidade desejada ou ao padrão de qualidade vigente, classificaram-se os processos de tratamento de esgotos através dos níveis de tratamento descritos a seguir.

#### **5.1.1 Tratamento Preliminar**

Segundo Von Sperling (1995), o tratamento preliminar tem como função remover os sólidos grosseiros e a areia em suspensão. Materiais de maiores dimensões são frequentemente removidos com gradeamento, e a areia por sedimentação em desarenadores. A remoção de sólidos grosseiros é necessária para proteção das bombas e tubulações, das unidades de tratamento subsequentes e dos corpos receptores. As finalidades de remoção de areia são de evitar abrasão nos equipamentos e tubulações, eliminar ou reduzir a possibilidade de obstrução em tubulações, tanques, orifícios, sifões, e facilitar o transporte do líquido, principalmente a transferência de lodo, em suas diversas fases. Além dessas remoções, tem-se também uma unidade para medição da vazão, geralmente constituída por uma calha de dimensões padronizadas (calha Parshall). Pode-se adotar, também, vertedores e mecanismos de medição em tubulações fechadas.

### 5.1.2 Tratamento Primário

No tratamento primário, são removidos os sólidos em suspensão e flutuantes. Como boa parte destes sólidos em suspensão é constituída de matéria orgânica em suspensão, há uma redução da carga de DBO dirigida ao tratamento secundário devido à sedimentação destes. Os processos de remoção desses sólidos são realizados por tanques de decantação ou por fossas sépticas e suas variantes, como os tanques de Imhoff. Nestes, os sólidos sedimentáveis que são removidos para o fundo permanecem por tempo suficiente para sua estabilização, a qual se dá em condições anaeróbias. Materiais flutuantes, como graxas e óleos, que são menos densos que o líquido, sobem para a superfície dos decantadores, e, após, são coletados e removidos do tanque para posterior tratamento (VON SPERLING, 1995).

### 5.1.3 Tratamento Secundário

O tratamento secundário tem como principal objetivo a remoção da matéria orgânica dissolvida (DBO solúvel) e em suspensão (DBO suspensa). Esta última é, em grande parte, removida no tratamento primário. Eventualmente, há também remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo). O processo essencial do tratamento secundário se dá por reações bioquímicas realizadas por bactérias, protozoários, fungos, etc. Para uma boa eficiência, deve-se ter contato efetivo entre esses organismos e o material orgânico contido nos esgotos para a devida conversão da matéria orgânica em gás carbônico, água e material celular (crescimento e reprodução dos microorganismos). Geralmente, inclui unidades de tratamento preliminar, mas pode ou não incluir as unidades para o tratamento primário. Os métodos mais comuns de tratamento a nível secundário são (VON SPERLING, 1995):

- a) lagoas de estabilização e variantes;
- b) lodos ativados e variantes;
- c) filtro biológico e variantes;
- d) tratamento anaeróbio;
- e) disposição sobre o solo: como contém mecanismos biológicos e elevada eficiência na remoção de poluentes, é classificado como tratamento secundário, apesar de ser um misto de tratamento e disposição final.

### **5.1.4 Tratamento Terciário**

Para Von Sperling (1995), no tratamento terciário, o objetivo é a remoção de poluentes que ainda não foram suficientemente removidos e de resíduos específicos, como:

- a) nutrientes (nitrogênio e fósforo);
- b) patogênicos;
- c) sólidos em suspensão remanescentes;
- d) sólidos inorgânicos dissolvidos;
- e) poluentes tóxicos;
- f) compostos não biodegradáveis.

De acordo com Von Sperling (1995), dependendo da concepção de tratamento local, a remoção de nutrientes e patogênicos pode ser considerada como integrante do tratamento secundário. Segundo o mesmo autor, este nível de tratamento é raro no Brasil.

## **5.2 SISTEMAS DE TRATAMENTO MAIS SUSTENTÁVEIS DISPONÍVEIS**

Atualmente, existem muitas tecnologias desenvolvidas que tratam os esgotos de uma maneira mais sustentável. A seguir são citados os sistemas de tratamento mais sustentáveis de esgotos disponíveis.

### **5.2.1 Disposição Controlada no Solo**

De acordo com Coraucci Filho et al. (1999) e Von Sperling (1995), a disposição controlada no solo pode ser a disposição final de efluentes líquidos já tratados, o tratamento de esgotos (a nível primário, secundário ou terciário), ou ambos. É uma atividade de reciclagem, pois ocorre a utilização do potencial hídrico e dos nutrientes presentes nos esgotos, empregando a natureza como receptora de resíduos e geradora de riquezas. O sistema solo-microorganismos-plantas pode estabilizar o esgoto sanitário por mecanismos físicos, químicos e biológicos, além de conduzirem à recarga do lençol freático e à evapotranspiração.

A disposição controlada no solo é uma opção muito interessante para o Brasil, pois é um país com muita área disponível, com condições climáticas adequadas, entre outros fatores.

Dispensa equipamentos e edificações, e necessita de investimentos apenas nas plantações a serem utilizadas como parte do tratamento. Consegue-se eficiência no tratamento como a obtida nos convencionais a nível terciário, a custos muito menores. Utilizam-se os nutrientes dos esgotos como fertilizantes (diminuindo a necessidade de produtos químicos tóxicos, utilizados em grande quantidade na agricultura) e se reutiliza a água para diversos fins. Contudo, como todos os tipos de tratamento, deve-se ter cautela, pois há restrições ao seu uso. É necessária a avaliação dos fatores climáticos, como a precipitação, evapotranspiração e temperatura, o tipo de solo da região e o nível do lençol freático. A seguir estão apresentados os principais métodos adotados (CORAUCCI FILHO et al., 1999).

#### 5.2.1.1 Infiltração lenta ou irrigação

Segundo Coraucci Filho et al. (1999) e Von Sperling (1995), neste método os esgotos fornecem água e nutrientes para as plantas. Parte do líquido pode ser perdida por evaporação ou percolado além do alcance das raízes das plantas, mas a maior parte vai para o tecido vegetal ou é transpirada para a atmosfera. Com uma disposição adequada, os esgotos podem ser usados em vegetações perenes, como bosques, florestas e pastos, e, com algum cuidado, em árvores frutíferas. A profundidade do lençol freático deve ter mais de 1,5 m para se prevenir a possibilidade de saturação da região das raízes. A aplicação dos esgotos pode-se dar pelas seguintes técnicas:

- a) aspersores fixos: aspersores assentados em linhas de tubulações, formando uma rede de distribuição, ilustrado na figura 6a;
- b) aspersores móveis: canhão hidráulico giratório e pivô central. Tanto estes quanto os aspersores fixos não são recomendados em alguns locais pela possibilidade de contaminação à distância devido aos aerossóis;
- c) aplicação superficial,
  - por inundação: é necessário que a cultura a ser irrigada permita a imersão da zona de raízes, pois este método consiste em cobrir com água uma área de cultivo, como mostra a figura 6b;
  - por meio de sulcos ou de crista e vala (figura 6c): a irrigação é estabelecida pela infiltração nas zonas das raízes e a alimentação, nos pontos à jusante, se estabelece pelo transporte do líquido através das valas, que é imposto pela declividade do terreno.

De acordo com Ercole (2003), as vantagens e desvantagens desse método são:

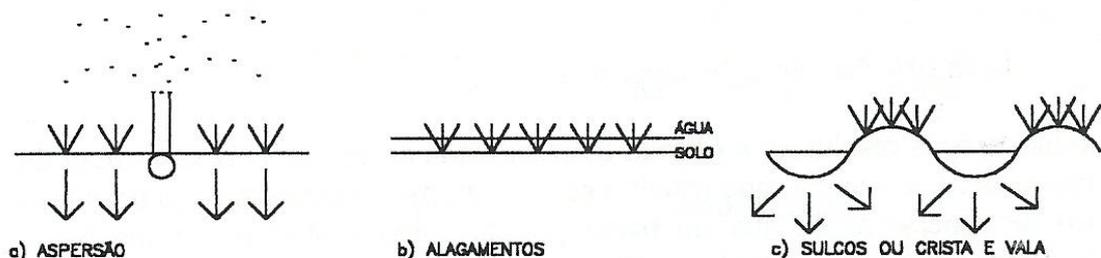
## a) vantagens,

- remoção de DBO e de coliformes com enorme eficiência;
- remoção de N e P satisfatória;
- combina o método de tratamento de esgotos com a disposição final;
- praticamente não necessita de recursos energéticos;
- a construção, operação e manutenção são simples;
- apresenta baixos custos de implantação e operação;
- resiste bem a variações de carga;
- não há lodo a ser tratado;
- proporciona fertilização e condicionamento do solo;
- a irrigação na agricultura proporciona retorno financeiro;
- recarga do lençol subterrâneo;

## b) desvantagens,

- necessita de áreas muito grandes;
- possibilidade de exalar maus odores, e, também, de surgir insetos e vermes;
- relativamente dependente do clima e dos requisitos de nutrientes dos vegetais;
- dependente das características do solo;
- com aplicação indiscriminada, há risco de contaminação dos vegetais;
- com aplicação por aspersão pode-se acarretar contaminação dos trabalhadores na agricultura;
- difícil fiscalização e controle com relação aos vegetais irrigados;
- nos períodos chuvosos, a aplicação deve ser suspensa ou reduzida;
- no caso de haver despejos industriais, há a possibilidade de ocorrência de efeitos químicos no solo, nos vegetais e na água subterrânea.

Figura 6 – Técnicas de aplicação do esgoto por infiltração lenta ou irrigação



OBS.: TODOS ESTES SISTEMAS SÃO PRECEDIDOS POR TRATAMENTO PRELIMINAR E DECANTADOR PRIMÁRIO

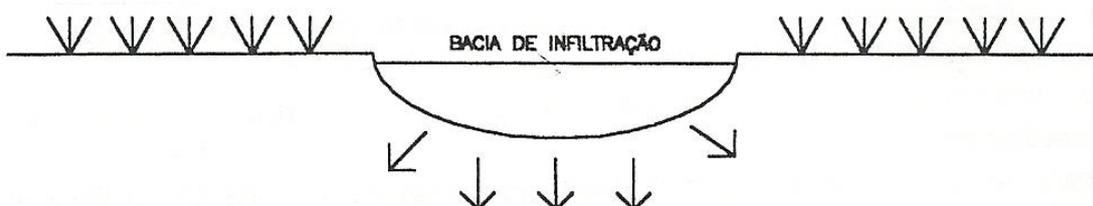
(fonte: ERCOLE, 2003, p. 93)

### 5.2.1.2 Infiltração rápida

Na infiltração rápida (figura 7), o solo atua como filtro, com ou sem vegetação, pois esta não interfere na eficiência do tratamento. São abertas bacias em terra, rasas e sem revestimento. O esgoto é aplicado de forma alternada, pois necessita estar em condições aeróbias para efetuar o tratamento. Como a taxa de aplicação é alta, as perdas por evaporação são pequenas, assim, a maior parte do líquido percola pelo solo. Os tipos de infiltração rápida são de percolação para a água subterrânea, de recuperação por sistema de drenagem subsuperficial ou por poços freáticos (VON SPERLING, 1995). Para Ercole (2003), as vantagens e desvantagens desse método são as seguintes:

- a) vantagens: as mesmas da infiltração lenta, mas com eficiência na remoção de poluentes um pouco menor, e também,
  - necessita de área bem menor que a infiltração lenta;
  - necessidade de declividade do solo reduzida;
  - aplicação durante todo ano;
- b) desvantagens: as mesmas da infiltração lenta, porém com possibilidade de contaminação da água subterrânea com nitratos.

Figura 7 – Sistema de tratamento por infiltração rápida



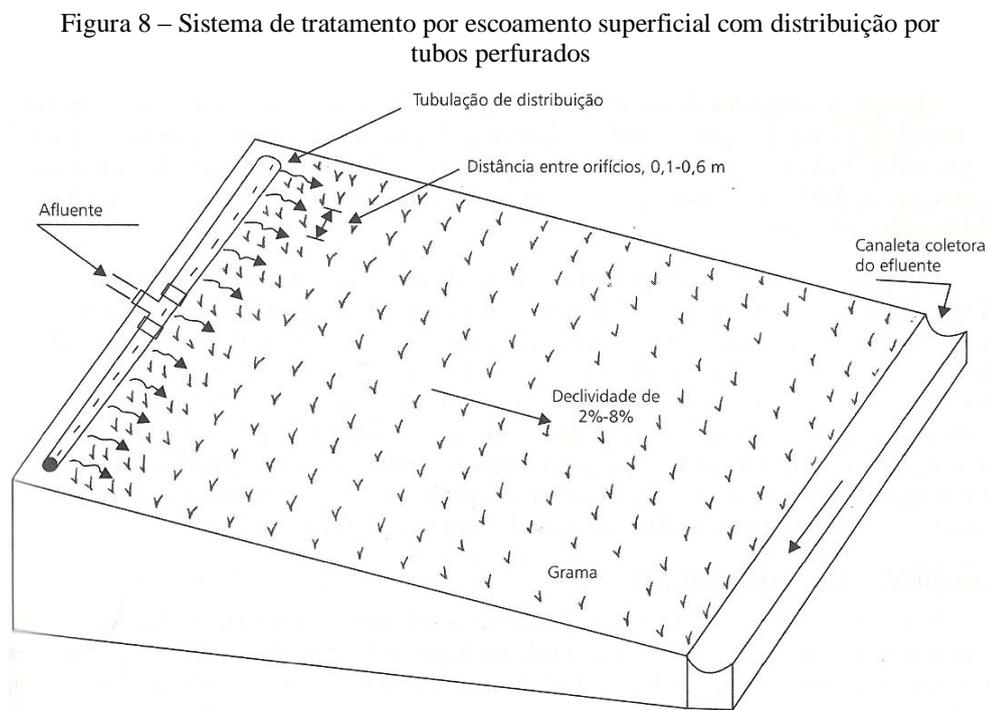
OBS.: ESTE SISTEMA É PRECEDIDO POR TRATAMENTO PRELIMINAR E DECANTADOR PRIMÁRIO

(fonte: ERCOLE, 2003, p. 94)

### 5.2.1.3 Escoamento superficial

Conforme Coraucci Filho et al. (1999), neste sistema o esgoto é distribuído ao longo do topo de uma rampa de solo com baixa permeabilidade e com cobertura vegetal, que geralmente é de grama. A distribuição se dá por meio de aspersores, ou por tubos perfurados (figura 8). O esgoto é tratado por filtração e estabilização da matéria orgânica por microorganismos que se estabelecem no solo e na vegetação. Esta, devido à presença dos nutrientes e ao excesso de

água, cresce muito rápido, sendo necessário efetuar a poda com bastante frequência. E, além de ser uma camada suporte para os microorganismos, evita a erosão do solo. A rampa possui uma declividade de 2 a 8%, com a superfície do solo uniforme. O afluyente escoava pelo terreno com uma grande parte sofrendo evaporação, parte infiltrando no solo e o restante sendo coletado numa vala construída ao longo da base da rampa. Para Ercole (2003), as vantagens desse método são as mesmas da infiltração rápida, porém tem as desvantagens de gerar efluente final e depender mais da declividade do terreno. Outra vantagem é que, dentre os métodos de disposição controlada no solo, é o que tem menor dependência das características do solo.



(fonte: CORAUCCI FILHO et al., 1999, p. 377)

#### 5.2.1.4 Infiltração subsuperficial

Neste método, é realizada uma escavação abaixo do nível do terreno e posterior preenchimento com solo poroso para livre fluxo dos esgotos pré-tratados (normalmente esses sistemas são conjugados a tratamento primário por fossas sépticas) e para proporcionar o armazenamento dos mesmos durante as vazões de pico. Dentro do solo, ocorre o tratamento complementar dos esgotos (VON SPERLING, 1995). Segundo Ercole (2003), estes sistemas

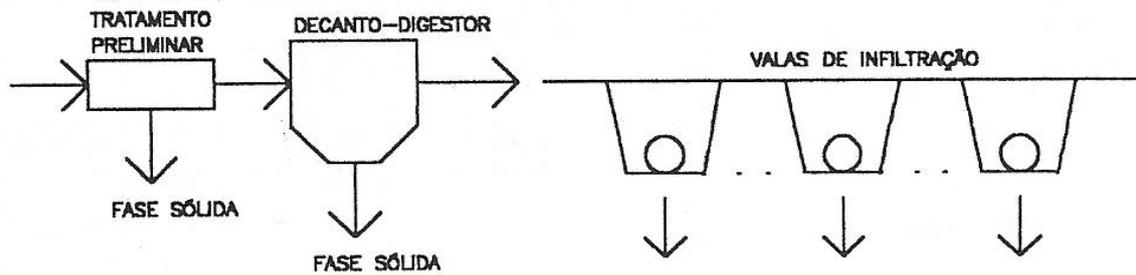
atingem nível de tratamento secundário, podendo chegar a terciário. Os sistemas de infiltração subsuperficial podem ser classificados conforme citado a seguir. E, as vantagens e desvantagens são:

- a) vantagens: além das citadas nas descrições específicas de cada método, possuem as mesmas vantagens do sistema de infiltração rápida, mais,
  - possível economia na implantação dos interceptores;
  - ausência de maus odores;
  - a superfície dos sistemas pode ser área verde, parque e jardins;
  - independência das condições climáticas;
  - ausência de problemas relacionados à contaminação de vegetais e dos trabalhadores;
- b) desvantagens: além das citadas nas descrições específicas de cada método, possuem as mesmas desvantagens do sistema de infiltração rápida, mais,
  - os sistemas necessitam de unidade de reserva para permitir a aplicação intermitente;
  - os sistemas maiores necessitam de solos bem permeáveis para reduzir os requisitos de área.

#### *5.2.1.4.1 Valas de Infiltração*

De acordo com Ercole (2003), neste processo ocorre a depuração devido aos processos físicos (retenção de sólidos) e bioquímicos (oxidação) por meio da percolação do esgoto no solo em condições aeróbias. Portanto, deve ter aplicação intermitente, exigindo no mínimo duas valas de infiltração com alternância no máximo a cada seis meses. Como utiliza o solo, este processo depende muito das características deste e de seu grau de saturação por água. A profundidade das valas, a largura, o diâmetro mínimo dos tubos de drenagem, o comprimento máximo e o espaçamento lateral mínimo devem ter, respectivamente, de 0,6 a 1 m, 0,5 a 1 m, 100 mm, 30 m e 1 m. A figura 9 ilustra este método.

Figura 9 – Sistema de tratamento por valas de infiltração

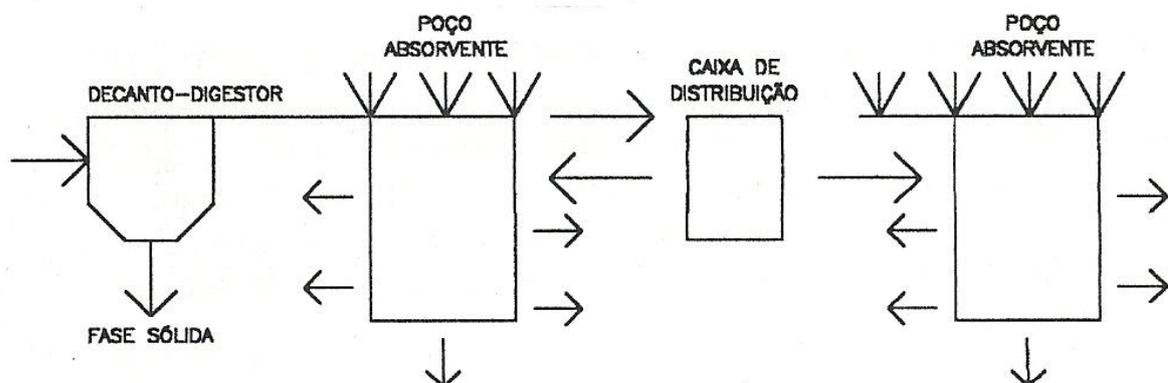


(fonte: ERCOLE, 2003, p. 96)

#### 5.2.1.4.2 Sumidouros (poços absorventes)

Os sumidouros ou poços absorventes (figura 10) consistem em uma escavação vertical em relação às valas de infiltração. Por esta razão, não devem ser utilizados em solos arenosos ou muito impermeáveis com fissuras. As paredes podem ser de alvenaria de tijolos gradeadas ou de concreto convenientemente furado. O diâmetro mínimo deve ser de 0,3 m e o fundo do sumidouro deve estar, no mínimo, a 1,5 m acima do nível do lençol freático. Os critérios e considerações principais são os mesmos das valas de infiltração, exceto a condição aeróbia, a qual se torna difícil de manter no interior do poço. Devido a esta dificuldade, a obstrução das superfícies internas do sumidouro é mais precoce. Quando houver troca de poço, no caso de dois ou mais poços com funcionamento intermitente, recomenda-se deixar o que foi substituído com as paredes internas ao ar livre, durante pelo menos seis meses, para recuperar a capacidade infiltrativa. A distância mínima entre eles deve ser de 1,5 m (ERCOLE, 2003).

Figura 10 – Sistema de tratamento com sumidouros

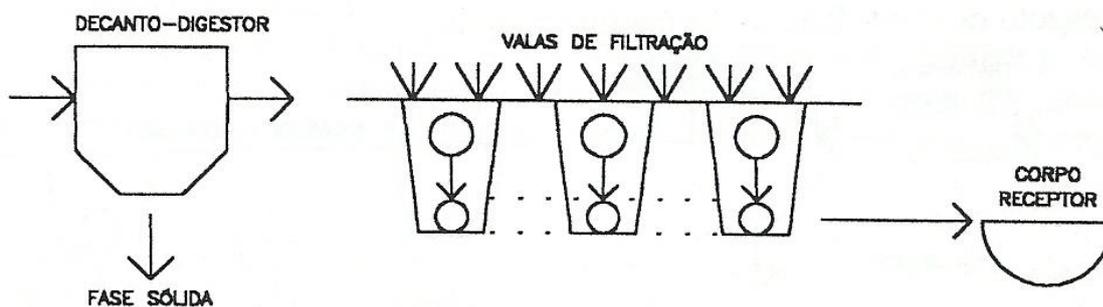


(fonte: ERCOLE, 2003, p. 96)

### 5.2.1.4.3 Valas de filtração ou filtros de areia

Segundo Ercole (2003), os sistemas de valas de filtração (figura 11) consistem em, no mínimo, duas valas de profundidade de 1,2 a 1,5 m, com canalizações superpostas, entre as quais se coloca uma camada de areia com espessura mínima de 0,5 m. Esta é responsável pela depuração do esgoto, devido aos microorganismos fixos nas superfícies dos grãos de areia. A canalização superior é responsável pela distribuição do esgoto ao longo da vala, com diâmetro mínimo de 100 mm, envolvida por pedra britada, coberta com papel alcatroado ou similar, sobre o qual é aplicada uma camada de terra para completar o enchimento da vala. A aplicação do esgoto deve ser realizada de forma alternada. A largura, na parte inferior das valas, deve ter no mínimo 0,5 m. Nesta região se encontra a canalização coletora de diâmetro mínimo de 100 mm para drenagem do efluente.

Figura 11 – Sistema de tratamento por valas de filtração



(fonte: ERCOLE, 2003, p. 95)

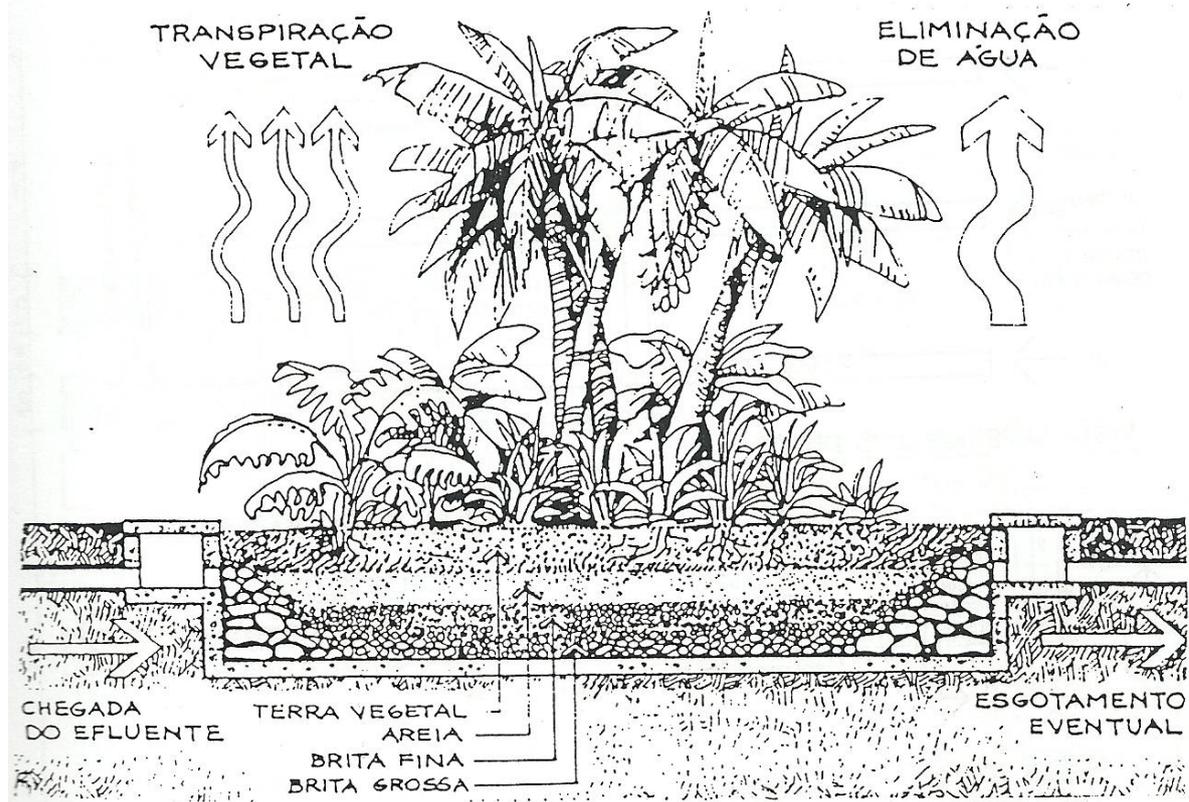
### 5.2.1.4.4 Leito de evapotranspiração

Os leitos de evapotranspiração (figura 12) são constituídos por uma camada de solo orgânico, não compactado, no qual se encontra uma zona de raízes de plantas, ou por uma camada de pedras, e, acima desta, o solo orgânico com a vegetação. As plantas cultivadas podem ser ornamentais, para ração animal, para produção de biomassa ou para alimentação humana (neste caso deve-se ter o cuidado das partes usadas não terem contato com o solo). O esgoto é distribuído no leito de evapotranspiração após tratamento primário e/ou secundário, e o efluente alcança o nível de tratamento terciário. Esses sistemas podem ser construídos no nível do terreno ou acima deste, quando a superfície se encontra próxima do lençol freático. O fundo e as laterais do leito de evapotranspiração podem ser impermeabilizados ou não

(permitindo a infiltração do efluente no solo após a passagem pelo solo orgânico) (ERCOLE, 2003).

Os principais processos físicos, químicos e biológicos são: precipitação e sedimentação de sólidos, decomposição anaeróbia (na parte inferior) e aeróbia, movimentação da água por capilaridade e absorção de água e nutrientes pelas plantas. A manutenção se dá pela colheita de frutos, retirada de mudas em excesso e de partes secas das plantas e podas (PAMPLONA; VENTURI, 2004<sup>16</sup> apud GALBIATI, 2009; MANDAI<sup>17</sup>, 2006 apud GALBIATI, 2009). Estes mesmos autores recomendam o uso de bananeiras, inhames e taiobas, mamoeiro e plantas ornamentais (copo-de-leite, maria-sem-vergonha, lírio-do-brejo, caeté) nos leitos.

Figura 12 – Sistema de tratamento por leito de evapotranspiração



(fonte: MASCARÓ; AZAMBUJA, 2010, p. 126)

<sup>16</sup> PAMPLONA, S.; VENTURI, M. Esgoto à flor da terra. *Permacultura Brasil*: soluções ecológicas. ano VI, v. 16, 2004.

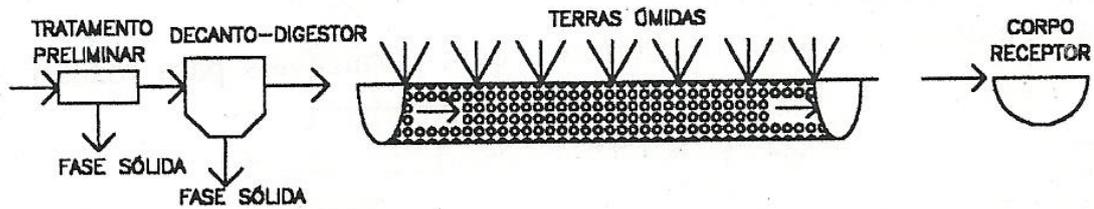
<sup>17</sup> MANDAI, P. *Modelo descritivo da implantação do sistema de tratamento de águas negras por evapotranspiração*. Brasília: ANEDE/Monitoria Canário Verde, 2006. Relatório técnico.

#### 5.2.1.4.5 Terras úmidas de fluxo subsuperficial (banhados, pântanos, wetlands)

Segundo Marques (1999), as terras úmidas (figura 13) são sistemas de tratamento que possuem um leito filtrante constituído por substratos e vegetação característica, o qual se encontra saturado com o nível da água próximo à superfície do terreno. O fundo do leito é impermeabilizado para evitar a contaminação do lençol freático e conter a água residuária e o substrato que suporta o crescimento das macrófitas aquáticas. O sistema mimetiza terras úmidas naturais, aplicando condições de contorno, as quais permitem organização dos componentes para a função de degradação da matéria orgânica e remoção de nutrientes presentes nos esgotos. As plantas utilizadas são as macrófitas aquáticas emergentes, cujas espécies mais usadas são dos gêneros *Thypha*, *Juncos*, *Scirpus*, *Carex* e *Phragmites*. Estas possuem um tecido vegetal (aerênquima), que é responsável pela transferência de oxigênio para seus rizomas e raízes, permitindo uma condição aeróbia na vizinhança imediata. Assim, o sistema é balanceado, pois solos de terras úmidas que ficam submersos por longos períodos são anaeróbios. O tratamento da água residuária é realizado pelo biofilme de bactérias, que se fixam nas superfícies das partes constituintes do leito, e pelas macrófitas aquáticas. Dentre as funções já citadas destas plantas, elas também retiram nutrientes e outros constituintes do esgoto e proporcionam sombra, a qual é promovida pelas folhas. Esta inibe o crescimento de algas sobre o substrato e em poças de água formadas pela irregularidade da superfície do substrato.

De acordo com Ercole (2003), quando se deseja maior remoção de nutrientes, é necessário efetuar o corte das plantas, as quais se desenvolvem mais intensamente, consumindo maior quantidade destes. Conforme esse mesmo autor, estudos em escala real e experimental têm mostrado boa eficiência desse sistema na remoção dos poluentes das águas residuárias por diversos mecanismos de sedimentação, filtração, precipitação e adsorção química, interações microbiana e da vegetação e complexação. Este sistema tem como vantagens o menor potencial para geração de odores e para surgimento de mosquitos e ratos.

Figura 13 – Sistemas de tratamento com terras úmidas



(fonte: ERCOLE, 2003, p. 97)

### 5.2.2 Tratamento de Esgotos com Separação das Águas

O esgoto pode ser separado em águas cinzas (provenientes de chuveiros, máquinas de lavar roupas e louças, pia da cozinha) e águas negras (resultantes do vaso sanitário). Alguns pesquisadores dividem em águas cinzas, águas negras (fezes) e águas amarelas (urina). De acordo com Otterpohl et al. (2002) e Ercole (2003), estes efluentes possuem características diferentes, portanto, se tratados separadamente, os processos tornam-se mais eficientes, uma vez que são específicos para as descontaminações de cada grupo e os equipamentos são de menor porte, portanto, mais econômicos. Além de se poder alcançar o reuso eficiente da água, da energia e de nutrientes.

Embora as águas negras contenham a maior parte dos patógenos e dos nutrientes encontrados no esgoto doméstico, o volume destas é bem menor do que o volume de água cinza produzido. Segundo uma análise de um estudo da composição do esgoto doméstico, foi observada a proporção de 25.000 a 100.000 litros por ano por pessoa de água cinza, para 500 litros de urina e apenas 50 litros anuais de fezes por pessoa (OTTERPOHL et al., 2002).

Aliado a isto, para Foresti et al. (1999) a separação das águas na fonte proporciona um tratamento das águas negras mais eficiente e compacto. Além de se trabalhar com elevada concentração de matéria orgânica, sem a diluição provocada pela mistura com as águas cinzas, o sistema não é afetado pelos produtos químicos e pela grande quantidade de sólidos presentes nestas. Segundo Ercole (2003), estes componentes são, entre outros, os seguintes:

- a) contaminantes químicos: provenientes dos produtos de limpeza, como,
  - detergentes;
  - sabões;

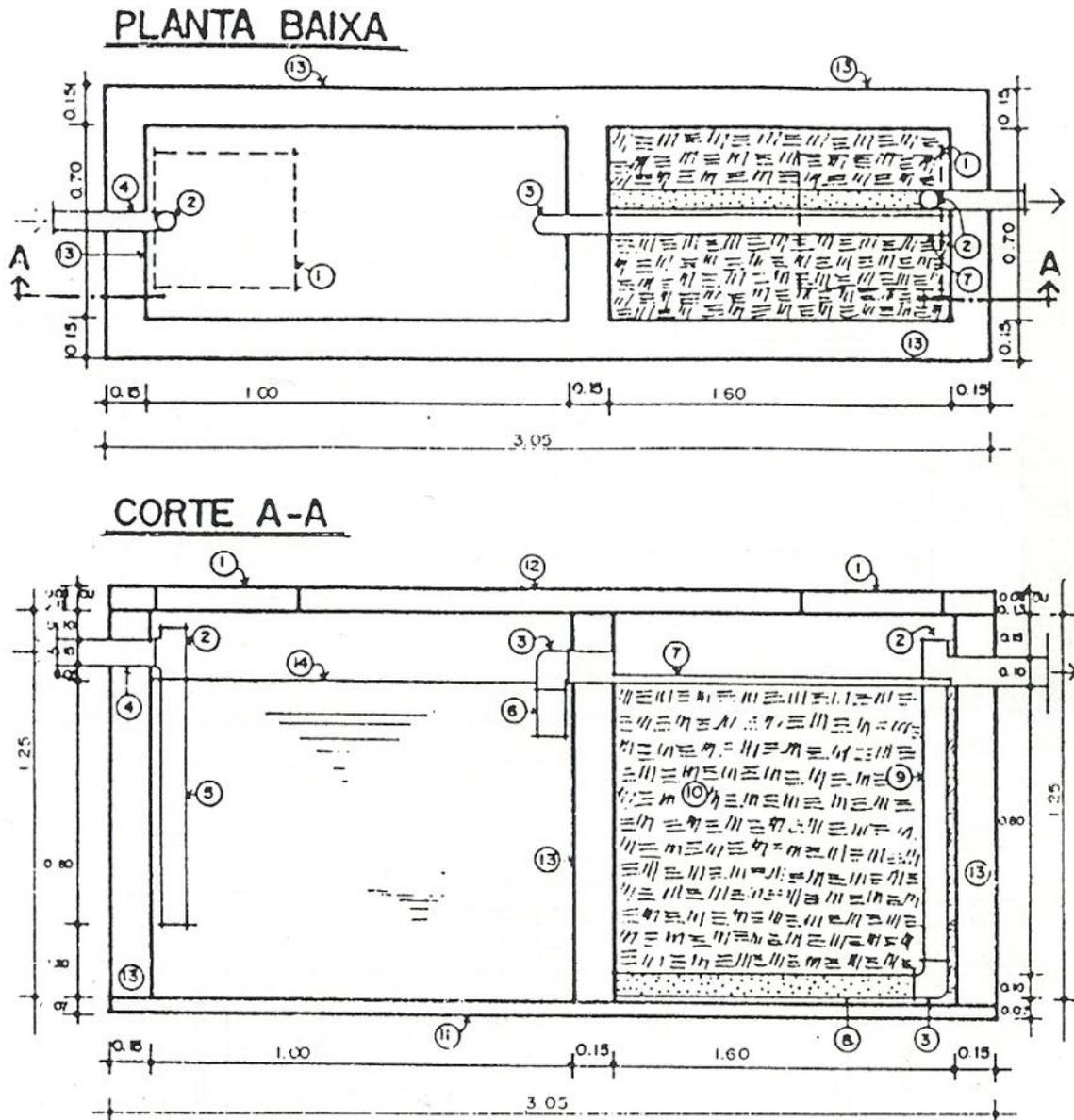
- sabonetes;
  - amaciantes;
  - água sanitária;
- b) sólidos em suspensão, como,
- terras;
  - poeiras;
  - fibras orgânicas e sintéticas dos tecidos;
  - fios de cabelo;
- c) gorduras, graxas e óleos.

Muitos dos tratamentos já citados neste trabalho são realizados com esta idéia de separação das águas na fonte. A preferência de um sistema para determinado tipo de efluente está sendo bastante pesquisada, mas, no momento, não está nada oficialmente declarado. A seguir, alguns exemplos de sistemas que estão sendo utilizados hoje em dia.

#### 5.2.2.1 Sistema modular com separação das águas

Neste sistema, as águas cinzas e negras são tratadas, primeiramente, em separado, e, depois, são misturadas e direcionadas ao tratamento por zona de raízes. Na fase inicial, as águas cinzas passam por um decantador, e as negras por um reator anaeróbio bicompartimentado, o qual consiste em um decanto-digestor, no primeiro compartimento, e, no segundo, um filtro anaeróbio. Veja as figuras 14 e 15. A seguir estão descritos os processos.

Figura 14 – Reator anaeróbio com elemento filtrante de aparas de plástico ou de pneus (dimensões em metros)

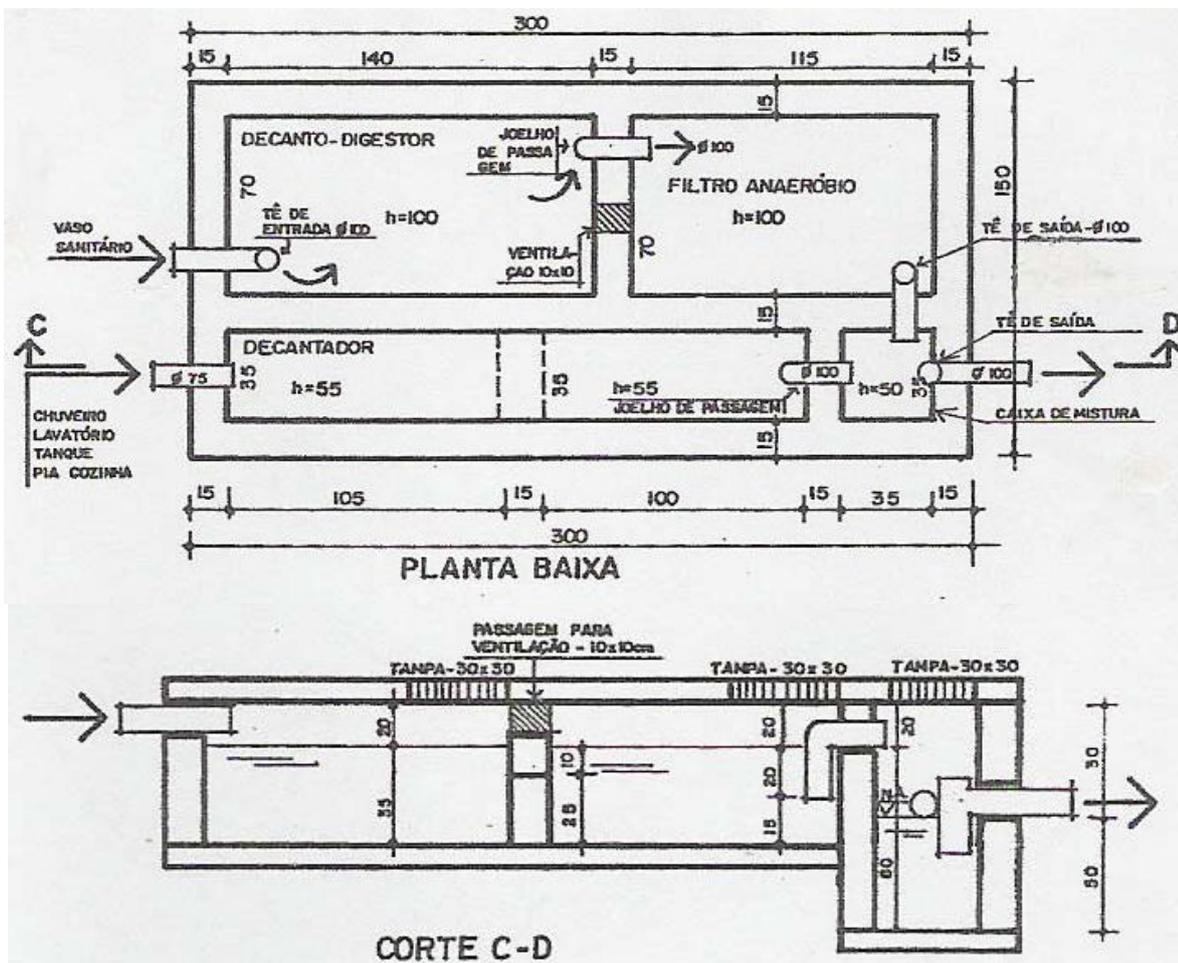


#### Convenções

- 1 – Tampas para inspeção (0,35 x 0,35 m).
- 2 – Tês de PVC Ø 100 mm.
- 3 – Joelhos de PVC Ø 100 mm.
- 4 – Tubo de entrada (afluente), PVC Ø 100 mm.
- 5 – Tubo prolongador, PVC Ø 100 mm, comprimento = 0,60 m.
- 6 – Tubo coletor, PVC Ø 100 mm, comprimento 0,20 m.
- 7 – Calha distribuidora (tubo de PVC Ø 100 mm cortado longitudinalmente).
- 8 – Tubo coletor, PVC Ø 100 mm com furos de Ø 10 mm e comprimento de 1,35 m.
- 9 – Tubo de saída (efluente), PVC Ø 100 mm, comprimento 0,85 m.
- 10 – Material de suporte do filtro anaeróbio (tijolos de seis furos, gradeados, ou aparas grandes de plásticos ou pneus).
- 11 – Fundo do reator (concreto, tijolos ou solo-cimento).
- 12 – Tampa do reator (concreto convencional ou pré-moldado).
- 13 – Paredes do reator (concreto ou alvenaria de tijolos).
- 14 – Nível da água.

(fonte: ERCOLE, 2003, p. 129)

Figura 15 – Conjunto de reator anaeróbio, decantador e caixa para mistura dos efluentes



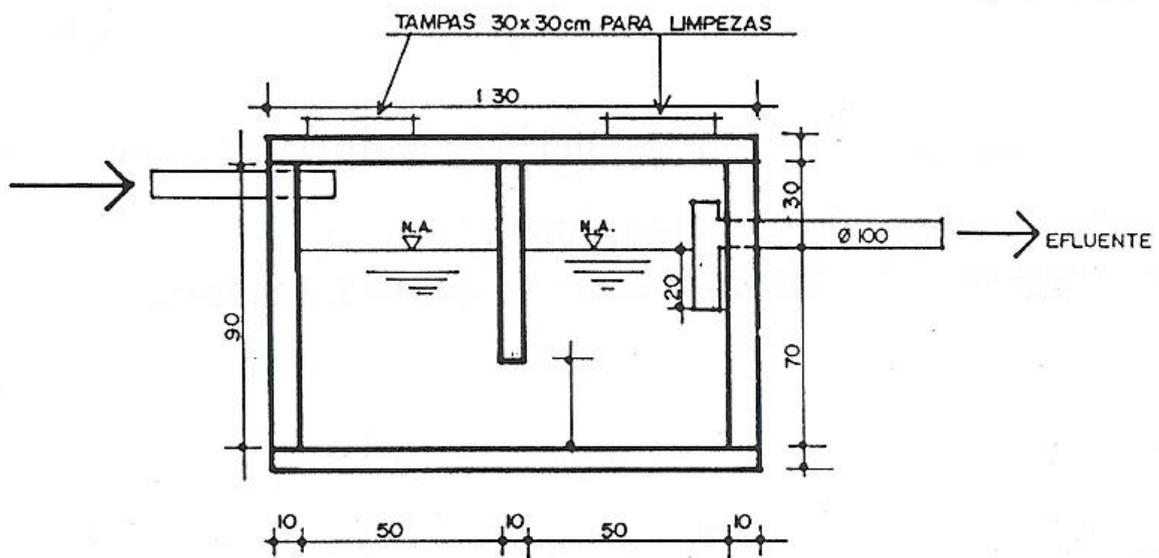
(fonte: ERCOLE, 2003, p. 131)

Conforme Ercole (2003), as águas cinzas, num primeiro momento, precisam passar por um processo de remoção dos elementos em suspensão (óleos, gorduras, sólidos). Isto é necessário para que se evite a obstrução das canalizações e, também, a redução da absorção das águas pelo leito de evapotranspiração e infiltração (LETI). O local onde ocorrem esses processos é o decantador (figura 16), o qual pode ter várias conformações, dependendo dos materiais disponíveis, da profundidade em que o solo pode ser escavado e da utilização direta das águas cinzas no LETI. No decantador, a água necessita permanecer o tempo de detenção hidráulica mínimo de duas horas, porém não excedendo vinte e quatro horas (para evitar condições anaeróbias), para que ocorra:

- a sedimentação dos sólidos;
- a acumulação dos óleos, graxas e sólidos de baixa densidade na superfície do líquido;

- c) o esfriamento das águas quentes, que vem, principalmente, da cozinha e do banheiro, pois estas águas aquecidas emulsificam as gorduras e as liberam somente quando esfriam, ocasionando o entupimento das canalizações.

Figura 16 – Decantador normal de duas câmaras (dimensionado para cinco pessoas, cotas em centímetros)



(fonte: ERCOLE, 2003, p. 115)

No início do tratamento das águas negras encontra-se o decanto-digestor seguido por um filtro anaeróbio. Segundo Andrade Neto et al. (1999a), no primeiro, ocorrem os seguintes processos:

- decantação: separação de fases (sólidos, líquidos e gases) por diferença de massa específica;
- sedimentação: deposição de sólidos por ação da gravidade;
- flotação: pequenas bolhas de gases, produzidas na digestão anaeróbia, principalmente do lodo, aceleram a ascensão de partículas sólidas, distinguindo-se de simples flutuação;
- desagregação e digestão dos sólidos sedimentados (lodo) e do material flutuante (escuma, com espessura de normalmente 20 a 25 cm).

Para este mesmo autor, um decanto-digestor é mais funcional do que um decantador e um digestor associados, porque propicia o tratamento anaeróbio da fase líquida em escoamento (mistura natural do lodo com o líquido e tempo de detenção hidráulica bem maior que nos decantadores usuais) e por acumularem, por longos períodos, o lodo digerido. Além disso, é

um sistema de tecnologia simples, compacta, de baixo custo e muito resistente às variações físicas e químicas dos esgotos.

O filtro anaeróbio é constituído por um tanque semelhante ao anterior, preenchido com um material que serve de suporte à biomassa, a qual realiza a depuração do esgoto. De acordo com Kato et al. (1999), o tratamento torna-se tão mais eficiente quanto maior a área superficial do material suporte por unidade de volume do tanque, pois maior pode ser a biomassa aderida. Contudo, deve-se ter atenção na distribuição e na forma deste, para evitar passagens preferenciais, garantir que o afluente distribua-se de forma uniforme e também favorecer a formação da biomassa nos interstícios do material. O próprio fluxo hidráulico garante uma mistura e contato bem satisfatórios, com a turbulência provocada entre os interstícios. O tempo de detenção hidráulica típico para esgotos domésticos é na faixa de horas, ao passo que o tempo de retenção celular geralmente é superior a 20 dias. Para Andrade Neto et al. (1999b), a granulometria deve ser a mais uniforme possível, pois o índice de vazios e o aproveitamento de área específica será relativamente maior, além de propiciar melhor distribuição do fluxo. É importante, também, que o material suporte não tenha formas achatadas, ou que propiciem encaixe e superposição.

Normalmente, o efluente do filtro anaeróbio é rico em sais minerais, bem clarificado e tem relativamente baixa concentração de matéria orgânica, inclusive dissolvida. Assim, é bastante adequado para tratamentos por disposição controlada no solo, tanto para infiltração, como para irrigação, revitalizando o solo e proporcionando a produção vegetal. Os filtros anaeróbios podem ser de fluxo (ANDRADE NETO et al., 1999b):

- a) ascendente,
  - maior retenção de lodo em excesso;
  - maior risco de entupimento dos interstícios;
  - alta eficiência: geração de grande quantidade de bactérias e baixa perda de sólidos que são arrastados no efluente, devido aos lodos em suspensão hidráulica e ao bom tempo de contato;
- b) descendente,
  - menor risco de entupimento: parte do lodo em excesso é gradativamente arrastado pelo efluente;
  - indicado tanto para altas como baixas cargas orgânicas;
- c) horizontal,
  - maior dificuldade na distribuição do fluxo;

- desempenho diferenciado ao longo do leito;
- utilizado para baixas cargas orgânicas.

Após essas etapas, deve-se realizar a mistura das águas cinzas e negras num tanque para evitar que alguns espécimes vegetais sejam prejudicados pela alcalinidade das águas cinzas. Essa mistura tende a um equilíbrio do pH (entre 6 e 7), pois o efluente do filtro anaeróbio é mais ácido. Em seguida, o efluente da caixa misturadora é conduzido para o leito de evapotranspiração e infiltração (LETI) ou apenas para o leito de evapotranspiração (no caso em que o nível do lençol freático está muito próximo à superfície, menos de 1 m de distância), para o aproveitamento dos nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo) pelas plantas. Promove-se, assim, uma irrigação permanente (ERCOLE, 2003).

De acordo com este mesmo autor, o excesso de água do LETI, devidamente purificado, com equivalência a um nível terciário de tratamento convencional de esgotos, infiltra no solo. Eventualmente, alguma quantidade escorre pela superfície. Assim, esse processo realimenta os mananciais de águas subterrâneas e superficiais.

Ainda este autor diz que os equipamentos utilizados neste sistema de tratamento modulado das águas residuárias são de construção simples, com uso de materiais comuns. A manutenção é fácil de realizar (limpeza periódica do decantador das águas cinzas). Geralmente não é necessário o uso de energia externa, sendo apenas utilizada a força gravitacional. É um sistema biológico, portanto, não é necessário nenhum tipo de aditivo químico. Assim, os custos de construção e manutenção são muito baixos.

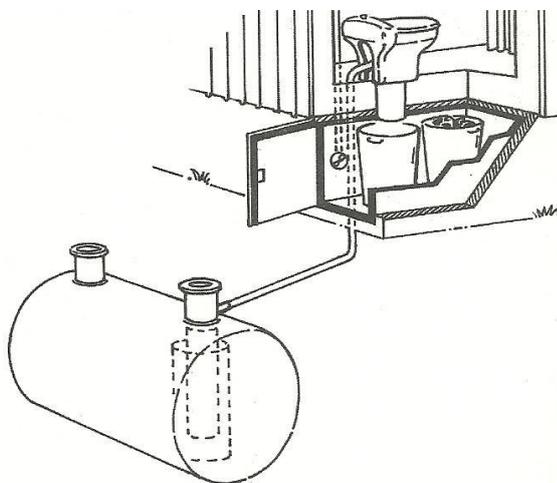
As vantagens e desvantagens do LETI são equivalentes às da infiltração subsuperficial, somente não necessita de unidade de reserva para aplicação intermitente. Quanto às outras etapas, são mais econômicas e eficientes pelo fato de realizar a separação das águas. Contudo, apresenta desvantagem para os casos em que se deseja aplicar esse método numa edificação onde já exista o sistema coletor sem a separação das águas, tornando a adaptação relativamente trabalhosa.

#### 5.2.2.2 Privadas secas

As privadas secas não utilizam água para transportar as fezes e a urina. Estes dejetos são armazenados e tratados num local diretamente anexado à privada. O produto final deste

tratamento é um composto rico em nutrientes, que deve ser utilizado como fertilizante para o solo. Conforme Del Porto e Steinfeld (c2000) e Winblad e Kilama (1985), deve-se separar a urina das fezes (figura 17 e 18), pois mantém o conteúdo do receptáculo seco, reduz a necessidade de adição de materiais ricos em carbono e conserva o valor fertilizante da urina. Esta pode ser utilizada na horta logo após sua diluição com cinco partes de água. Abaixo, estão descritos alguns tipos de privadas secas.

Figura 17 – Esquema de um banheiro seco com separação de urina



(fonte: DEL PORTO; STEINFELD, c2000, p. 121)

Figura 18 – Vaso sanitário separador de urina

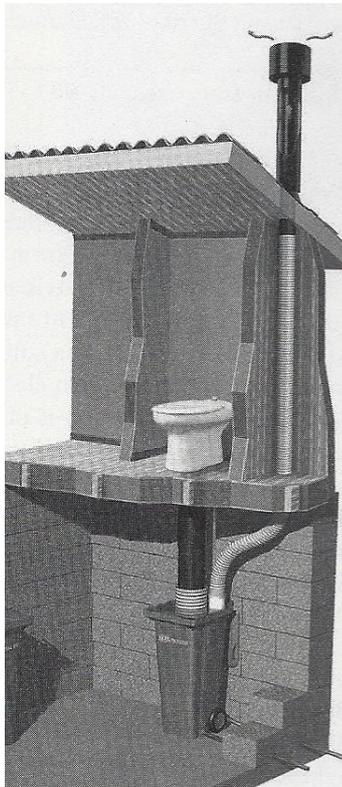


(fonte: DEL PORTO; STEINFELD, c2000, p. 121)

#### 5.2.2.2.1 Sistema com recipientes móveis

As excretas são coletadas em um pequeno balde ou tonel inserido numa estrutura sobre a qual se encontra o assento sanitário (figura 19). A cada vez que o indivíduo utiliza o sanitário, as excretas devem ser cobertas com terra, cinzas, serragem ou outro material adequado. Quando o recipiente está cheio, substitui-se por outro e coloca-se num local apropriado até que a compostagem se complete. Após isto, pode ser utilizado como fertilizante.

Figura 19 – Sistema com recipientes móveis



(fonte: DEL PORTO; STEINFELD, c2000, p. 85)

Figura 20 – Sistema carrossel



(fonte: DEL PORTO; STEINFELD, c2000, p. 79)

#### 5.2.2.2.2 Sistema carrossel

É um sistema de uso contínuo, o qual consiste num receptáculo com quatro compartimentos, como mostra a figura 20. Quando o espaço do compartimento já está com o conteúdo que suporta, deve-se girar o receptáculo para se utilizar o seguinte, posicionando o assento sanitário sobre este. Após determinado tempo (necessário para completar a compostagem), esvazia-se o compartimento anterior ao assento.

#### 5.2.2.2.3 Sistema com duas câmaras

Consiste em duas câmaras utilizadas alternadamente (figura 21). Acima destas, coloca-se o vaso sanitário e o tampão, na que está em uso e na que está com o conteúdo em fase de compostagem, respectivamente (figura 22). Geralmente são construídas acima do solo, pois se tem mais facilidade para esvaziá-las.

Figura 21 – Sistema com duas câmaras tipo Bason



(fonte: foto da autora)

Figura 22 – Assentos utilizados alternadamente



(fonte: foto da autora)

Baseada em Ercole (2003), as vantagens e desvantagens desses sistemas são as seguintes:

a) vantagens,

- baixo custo de construção;
- operação e manutenção simples;
- não consome água;
- risco à saúde mínimo;
- não polui o solo: pelo contrário, o resíduo, após o processo, pode ser utilizado como fertilizante, enriquecendo este solo;
- não depende do nível do lençol freático;
- pode dispensar escavações;

b) desvantagens,

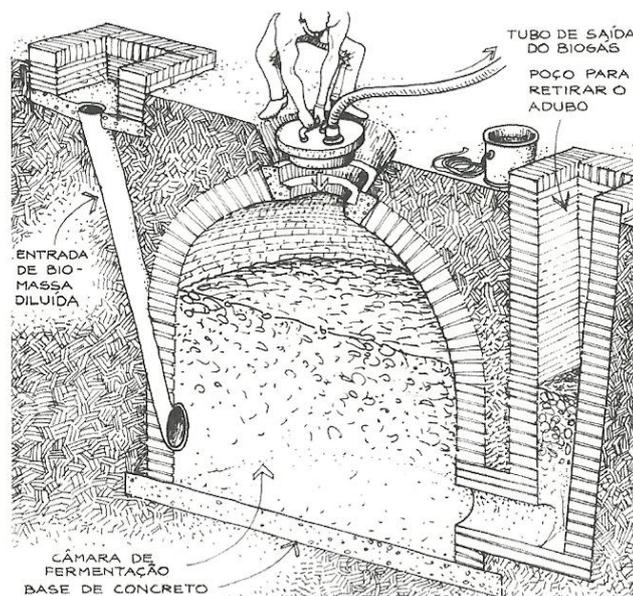
- inconvenientes para áreas de alta densidade populacional;
- aversões em certas pessoas no manejo do composto;
- desagradável no aspecto funcional para muitas pessoas já acostumadas com vasos sanitários de descarga hídrica.

### 5.2.2.3 Biodigestores

Conforme Mascaró e Azambuja (2010), os biodigestores (figura 23) consistem num recipiente hermeticamente fechado no qual se realiza a decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos.

Estes resíduos, antes de serem introduzidos, são misturados com água, até formar uma massa plástica e homogênea, a qual é conduzida pela tubulação de entrada até a parte inferior da câmara de digestão. À medida que a matéria orgânica se decompõe vai sendo liberado o biogás, o qual pode ser utilizado para diversos fins, como no fogão, no aquecimento de água para banho, etc. O material já digerido sai pela tubulação de saída e pode ser utilizado como fertilizante. Basicamente, existem dois tipos de biodigestores: os intermitentes de produção descontínua (simples de construir e complicados de operar) e os de operação contínua, os quais permitem carga diária, com pequenas quantidades de matéria orgânica e, simultaneamente, a retirada do material digerido, sem que para isso o biodigestor tenha que ser aberto (mais complexos de construir e mais simples de operar).

Figura 23 – Biodigestor contínuo vertical tipo chinês



(fonte: MASCARÓ; AZAMBUJA, 2010, p. 154)

As vantagens e desvantagens desse sistema, segundo Ercole (2003), estão apresentadas abaixo:

a) vantagens,

- tratamento dos esgotos e de resíduos sólidos (lixo orgânico e excretas de animais) no mesmo sistema;
- produção de biogás;

- o resíduo do tratamento é um composto seguro e muito bom para se usado como adubo;
- sem risco de poluição acidental ao meio ambiente;

b) desvantagens,

- o biogás pode ser explosivo, quando combinado com uma determinada quantidade de ar;
- operação permanente: alimentação, retirada do composto e agitação da mistura no interior do biodigestor;
- funcionamento apenas em temperaturas entre 30 e 37°C;
- se a dosagem não for adequada (recomenda-se metade sólidos e metade líquidos), pode azedar e paralisar a digestão, sendo necessário o esvaziamento do biodigestor para este poder funcionar novamente;
- pH da água deve estar entre 7,2 e 8,2;
- a água não deve conter desinfetantes, detergentes, produtos clorados e defensivos agrícolas;
- os estrumes devem estar isentos de antibióticos.

### 5.2.3 Lagoas de Estabilização

Segundo Von Sperling (2000), as lagoas de estabilização são os sistemas mais simples para tratamento de esgotos. Abaixo, estão citadas as lagoas que não necessitam de energia externa para seu funcionamento.

#### 5.2.3.1 Lagoas facultativas

Nas lagoas facultativas (figura 24), o esgoto deve permanecer retido por um período de tempo suficiente (normalmente superior a 20 dias) para que se realize a estabilização da matéria orgânica por processos naturais. Estes acontecem nas três zonas dessas lagoas: zona anaeróbia, zona aeróbia e zona facultativa. A primeira é constituída pelo lodo de fundo (matéria orgânica em suspensão que foi sedimentada), o qual sofre o processo de decomposição anaeróbia. Assim, este lodo é convertido em gás carbônico, água e metano e outros, e somente a fração inerte (não biodegradável) permanece na camada do fundo. Acima desta zona, encontra-se a camada facultativa, onde pode haver tanto a presença como a ausência de oxigênio, sendo necessárias bactérias que sobrevivam nesses dois casos. Como a fonte de oxigênio vem da fotossíntese realizada pelas algas, e esta necessita da energia solar para a sua ocorrência, a partir de certa profundidade, a penetração de luz é menor,

dificultando este processo. Já, próximo à superfície, a fotossíntese é mais elevada, constituindo a zona aeróbia, na qual a matéria orgânica é oxidada por meio da respiração aeróbia. A profundidade dessas lagoas varia de 1,5 m a 3 m (VON SPERLING, 2000). Segundo Ercole (2003), o nível de tratamento alcançado por esse sistema é o secundário, podendo atingir o terciário. Para esses dois autores, as vantagens e desvantagens deste método são as seguintes:

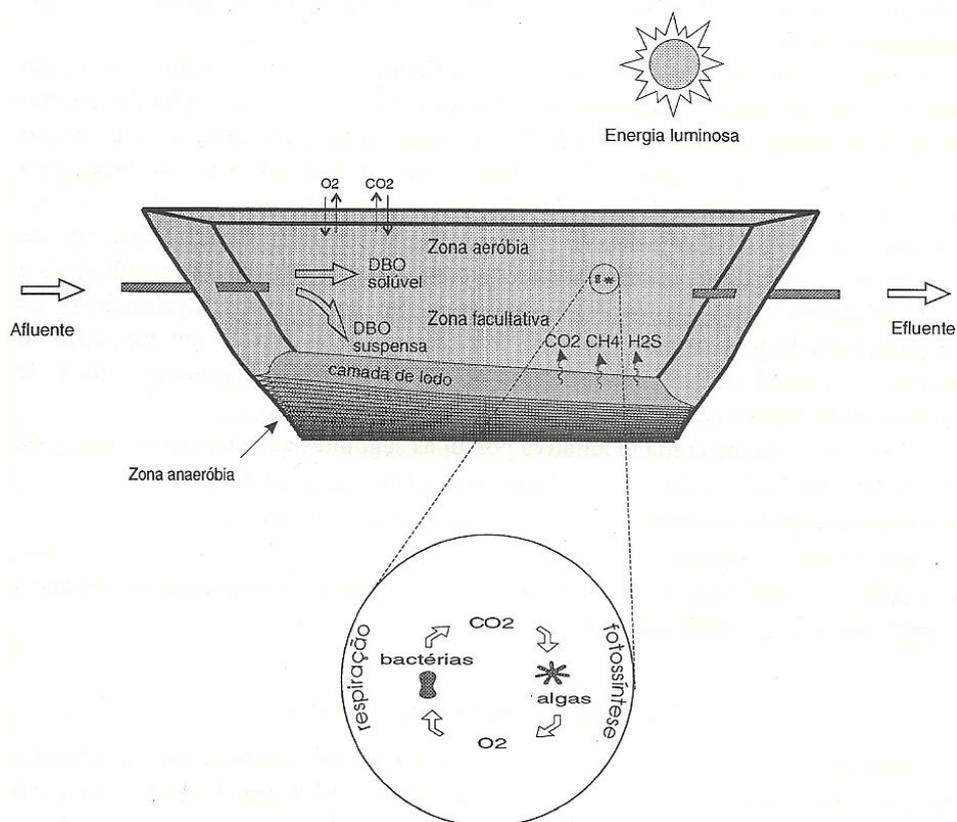
a) vantagens,

- satisfatória eficiência na remoção de DBO;
- eficiência na remoção de patogênicos;
- construção, operação e manutenção simples;
- reduzidos custos de implantação e operação;
- ausência de equipamentos mecânicos;
- requisitos energéticos praticamente nulos;
- satisfatória resistência a variações de carga;
- necessidade de remoção de lodo somente após períodos superiores a 20 anos;

b) desvantagens,

- elevados requisitos de área;
- dificuldade de satisfazer padrões de lançamento bem restritivos;
- possibilidade de descaso na manutenção (crescimento de vegetação) devido à sua simplicidade;
- possibilidade de remoção de algas do efluente necessária para o cumprimento de padrões rigorosos;
- desempenho variável com as condições climáticas (temperatura e insolação);
- possibilidade de desenvolvimento de insetos.

Figura 24 – Lagoa facultativa



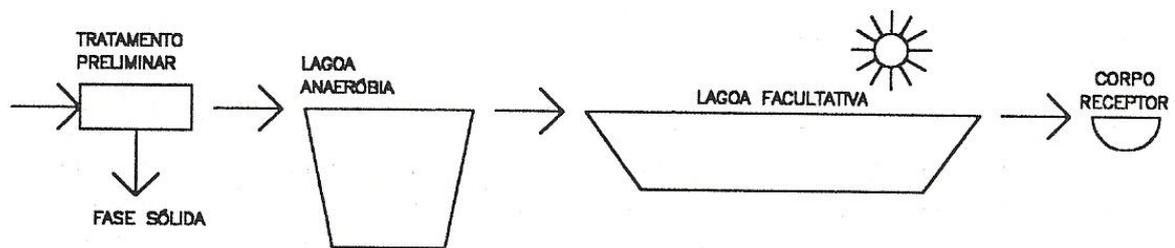
(fonte: VON SEPERLING, 2000, p. 19)

### 5.2.3.2 Sistema de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas

De acordo com Von Sperling (2000), as lagoas anaeróbias necessitam de condições estritamente anaeróbias, portanto deve ser lançada uma grande carga de DBO por unidade de volume da lagoa para fazer com que a taxa de consumo de oxigênio seja muito superior à taxa de produção (fotossíntese e reaeração atmosférica). Para reduzir a possibilidade de penetração de oxigênio produzido na superfície para as demais camadas, estas lagoas têm usualmente de 4 m a 5 m de profundidade, conseqüentemente, a área requerida é menor. O tempo de detenção do esgoto normalmente está entre 3 a 6 dias. Como a eficiência de remoção de DBO nas lagoas anaeróbias é de 50% a 60 %, é necessária uma unidade de tratamento adicional, a qual, a mais utilizada, é a lagoa facultativa, compondo, assim, o sistema de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, também conhecido como sistema australiano (figura 25). Conforme Ercole (2003), o nível de tratamento deste sistema é o secundário, podendo alcançar o terciário. Esses dois autores citam as seguintes vantagens e desvantagens desse método:

- a) vantagens: as mesmas das lagoas facultativas, mas com uma diminuição dos requisitos de área devido à associação das lagoas;
- b) desvantagens: as mesmas das lagoas facultativas, mais,
- possibilidade de maus odores na lagoa anaeróbia, caso o sistema não esteja bem equilibrado;
  - eventual necessidade de elevatórias de recirculação do efluente para controle dos maus odores;
  - necessidade de um afastamento razoável das residências.

Figura 25 – Sistema de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas



(fonte: ERCOLE, 2003, p. 86)

### 5.2.3.3 Lagoas com plantas aquáticas

Conforme Ercole (2003), as lagoas com plantas aquáticas são rasas, de profundidade de 0,2 m a 0,3 m, com diques meandantes os quais se ajustam de acordo com as curvas de nível e o paisagismo ao redor. A altura máxima destes é de 0,5 m. Existem três tipos dessas lagoas:

- a) lagoas com jacinto d'água (figura 26): esta planta aquática flutuante tem bastante capacidade fotossintética, que promove uma grande absorção de nutrientes minerais e substâncias orgânicas e até macromoleculares. Produção de biomassa intensiva, exigindo colheita e manejo sistemático;
- b) lagoas de purificação pelas raízes de plantas aquáticas (figura 27): lagoas com solo permeável e frouxo, algumas vezes com leitos de gravetos, onde as plantas se estabelecem e forma a zona de raízes, a qual efetua a purificação. Pode ou não haver colheita de biomassa;
- c) banhados naturais: semelhantes às terras úmidas já citadas na página 50 deste trabalho.

Baseada neste mesmo autor, as vantagens e desvantagens desse sistema são:

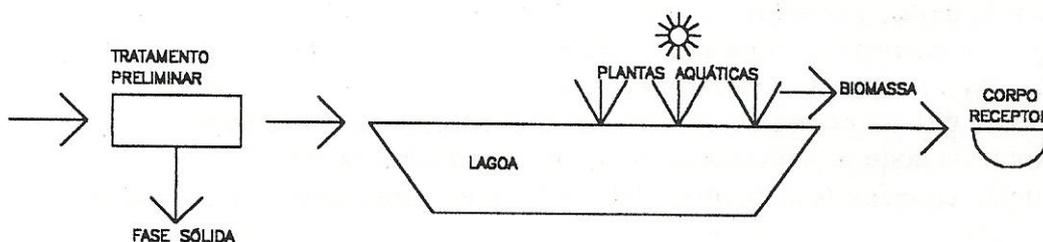
- a) vantagens: as mesmas das lagoas facultativas, mais,
- possibilidade de utilização da biomassa como composto orgânico;

- algumas espécies (*Eichhornia*, *Heteranthera* e *Enhydra*) servem como forragem para cavalos, vacas e porcos;
- possibilidade de utilização da *Eichhornia* na produção de papel com as vantagens de que a sua celulose não tem lignina e, portanto, não tem a poluição causada pela lixívia negra;
- possibilidade de produção de 220 a 440 metros cúbicos de CH<sub>4</sub> através da produção de 0,9 a 1,8 toneladas de matéria vegetal seca por dia em um hectare de *Eichhornia* alimentadas por esgotos;

b) desvantagens,

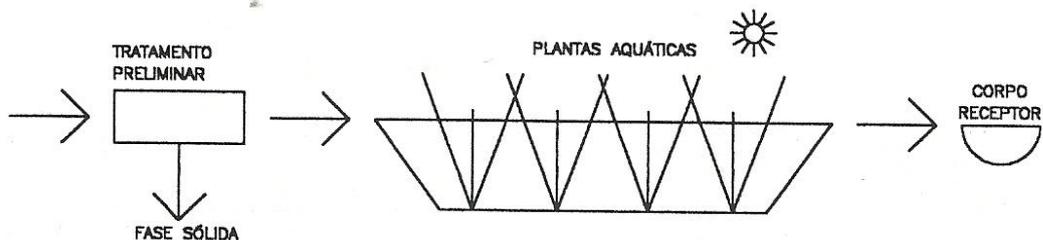
- elevados requisitos de área;
- possibilidade de descaso na manutenção (crescimento excessivo da biomassa) devido à sua simplicidade;
- necessidade de uma área anexa para a disposição e secagem das plantas aquáticas removidas;
- devido a pouca profundidade destas lagoas, a falta ou remoção deficiente das plantas pode causar a morte e o afundamento destas, provocando o rápido assoreamento e a criação de condições anaeróbias;
- desempenho variável com as condições climáticas (temperatura e insolação);
- possibilidade do desenvolvimento de mosquitos e caramujos.

Figura 26 – Sistema de tratamento por lagoa com jacinto d'água



(fonte: ERCOLE, 2003, p. 89)

Figura 27 – Sistema de tratamento com lagoas de purificação pelas raízes de plantas aquáticas



(fonte: ERCOLE, 2003 p. 90)

#### 5.2.3.4 Lagoas de maturação

De acordo com Von Sperling (2000), as lagoas de maturação são mais rasas que os demais tipos de lagoas e têm como principal objetivo a remoção de patogênicos, sendo um polimento no efluente de qualquer um dos sistemas de tratamento de esgotos. Assim, as condições ambientais dentro das lagoas de maturação são adversas para os patogênicos, como radiação ultravioleta, elevado pH, elevada disponibilidade de oxigênio, temperatura mais baixa que a do corpo humano, falta de nutrientes e predação por outros organismos. Estas lagoas são, portanto, uma opção de desinfecção do efluente bastante econômica em relação às mais convencionais, como a cloração.



## 6 ANÁLISE E SELEÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Este capítulo contempla a seleção do sistema de tratamento de esgotos mais adequado para o Ceres, tomando princípios de sustentabilidade como prioridade. No capítulo anterior, foram apresentadas formas de tratamento que não necessitam de energia externa para seu funcionamento, pois, como já foi mencionada, a diminuição do consumo de energia deve ser essencial para tornar este Planeta mais sustentável.

### 6.1 ANÁLISE DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Para se realizar a análise dos tratamentos de esgotos apresentados neste trabalho, foram elaborados dois quadros, baseados em Ercole (2003). Estes permitem uma avaliação mais sucinta dos processos analisados em relação a requisitos de implantação, de operação, de remoção de poluentes e de perturbações ambientais. Aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais são de grande importância na seleção do sistema a ser aplicado, pois, conjuntamente, direcionam a uma escolha mais sustentável. No quadro 1, estão apresentados os principais requisitos de implantação e de operação dos sistemas de tratamento de esgotos. Segundo Ercole (2003), estes são os seguintes:

- a) requisitos de implantação,
  - área necessária: requisito fundamental para a seleção, pois, no caso em questão, não há grande disponibilidade de área (aproximadamente 60 m<sup>2</sup>);
  - conteúdo energético dos materiais: quanto a este, não foi necessário analisá-lo, pois a questão energética foi o primeiro critério na escolha dos sistemas apresentados neste trabalho;
  - complexidade construtiva: exigência de equipamentos e mão de obra especializada para a construção dos sistemas de tratamento de esgotos;
  - custos de implantação: apresentam-se os custos médios de implantação;
- b) requisitos de operação,
  - complexidade operativa: exigência de equipamentos e mão de obra especializada para a operação dos sistemas de tratamento de esgotos;
  - potência requerida: mesma questão do conteúdo energético dos materiais;

- tempo de detenção hidráulica: quanto menor este, menor será o volume dos equipamentos, ocupando áreas menores e diminuindo o custo;
- quantidade de lodo produzido: exigência de locais e equipamentos para a disposição, tratamento e destinação final;
- frequência de remoção do lodo: proporcional a quantidade de lodo produzido;
- custos de operação: bastante vinculados a complexidade operativa, quanto mais complexo o sistema, maior será o custo de operação.

Quadro 1 – Quadro de análise dos requisitos de implantação e de operação dos sistemas de tratamento de esgotos

Sistemas de tratamento de esgotos	Requisitos de Implantações			Requisitos de Operações				
	A (m <sup>2</sup> /hab)	Complexidade construtiva	Custos de implantação (US\$/hab.)	Complexidade operativa	Tempo de detenção Hidráulica (dias)	Quantidade de lodo produzido (m <sup>3</sup> /hab.ano)	Frequência de remoção de lodo	Custos de operação (US\$/ /hab.ano)
Infiltração lenta ou irrigação	10 – 50	Baixa	10 – 20	Média	NA	0	-----	5 – 10
Infiltração rápida ou de alta taxa	1 – 6	Média	5 – 15	Baixa	NA	0	-----	5 – 10
Escoamento superficial	1 – 5	Baixa	5 – 15	Baixa	NA	0	-----	5 – 10
Infiltração subsuperficial	1 – 6	Média	5 – 15	Baixa	NA	0	-----	5 – 10
Tanque séptico e sumidouros	0,1 – 0,2	Baixa	20 – 40	Baixa	0,5 – 1	0,1	1 a 5 anos	4
Tanque séptico e valas de filtração	2	Média	20 – 40	Baixa	1 – 2	0,1	1 a 5 anos	4
Tanque séptico e valas de infiltração	3 – 10	Média	20 – 40	Baixa	1 – 2	0,1	1 a 5 anos	4
Tanque séptico e filtro anaeróbico	0,2 – 0,4	Baixa	20 – 40	Alta	1 – 2	0,07 – 0,1	1 a 5 anos	5
Sistema modular com separação das águas	1 – 3	Baixa	10 – 20	Baixa	1 – 2	0,01 <sup>18</sup>	10 anos <sup>19</sup>	2
Privadas secas	3 – 5	Baixa	30 – 150	Média	NA	NA	NA	NA
Biodigestores <sup>20</sup>	0,15 – 0,2	Média	20 – 40	Baixa	15 - 60	0,1	1 a 5 anos	4

continua

<sup>18</sup> Estes volumes não incluem os sólidos acumulados no decantador para as águas cinzas, que faz parte deste sistema de tratamento.

<sup>19</sup> Esta previsão do período para a remoção do lodo é somente do reator anaeróbico, específico para o tratamento das águas negras. As remoções dos sólidos retidos no decantador para as águas cinzas devem ser realizadas de duas a três vezes por ano.

<sup>20</sup> Os dados apresentados são os de um decanto-digestor (Tanque Imnhoff), de câmaras sobrepostas, ocorrendo na câmara superior a sedimentação dos sólidos e na inferior a digestão destes, com a produção do gás metano.

continuação

Sistemas de tratamento de esgotos	Requisitos de Implantações			Requisitos de Operações				
	A (m <sup>2</sup> /hab)	Complexidade construtiva	Custos de implantação (US\$/hab.)	Complexidade operativa	Tempo de detenção Hidráulica (dias)	Quantidade de lodo produzido (m <sup>3</sup> /hab.ano)	Frequência de remoção de lodo	Custos de operação (US\$/hab.ano)
Lagoas facultativas	2 – 5	Média	10 – 30	Baixa	15 – 30	0,03 – 0,1	> 20 anos	5 – 10
Lagoas anaeróbias e facultativas associadas	1,5 – 3,5	Média	10 – 25	Baixa	12 – 24	0,1 – 0,15	> 20 anos	5 – 10
Lagoas com plantas aquáticas	2 – 5	Média	10 – 30	Baixa	15 – 30	0,1 – 0,15	> 10 anos	5 – 10

(fonte: adaptado de ERCOLE, 2003)

No quadro 2 estão expostos os requisitos de remoção de poluentes e perturbações ambientais.

a) requisitos de remoção de poluentes,

- demanda bioquímica de oxigênio (DBO);
- nitrogênio (N);
- fósforo (P);
- coliformes totais;
- sólidos suspensos totais (SST);

b) requisitos de perturbações ambientais,

- odores;
- ruídos;
- aerossóis: os sistemas citados independem destes, assim, não requer análise;
- insetos e vermes.

Quadro 2 – Quadro de análise dos requisitos de remoção de poluentes e de perturbações ambientais dos sistemas de tratamento de esgotos

Sistemas de tratamento de esgotos	Remoções de Poluentes					Perturbações Ambientais		
	DBO	Nitrogénio	Fósforo	Coliformes totais	Sólidos suspensos totais	Odores	Ruídos	Insetos e vermes
Infiltração lenta ou irrigação	94 - 99	65 – 95	75 - 99	> 99	> 99	Alto	Baixo	Médio
Infiltração rápida ou de alta taxa	86 - 98	10 – 80	30 - 99	> 99	> 99	Alto	Baixo	Médio
Escoamento superficial	90 - 98	10 – 40	85 - 95	> 99	> 99	Baixo	Baixo	Baixo
Infiltração subsuperficial	85 - 95	10 – 80	20 - 50	90 - 99	70 - 95	Médio	Baixo	Médio
Tanque séptico e sumidouros	30 - 50	8 – 10	40	50 - 60	45 - 50	Médio	Baixo	Médio
Tanque séptico e valas de filtração	70 - 95	30 – 70	50 - 90	> 99	70 - 95	Médio	Baixo	Médio
Tanque séptico e valas de infiltração	50 - 85	30 – 70	30 - 70	> 99	70 - 95	Médio	Baixo	Médio
Tanque séptico e filtro anaeróbio	70 - 90	10 – 25	10 – 20	60 - 90	60 - 90	Baixo	Médio	Baixo
Sistema modular com separação das águas	90 - 98	50 – 80	85 - 95	> 99	> 99	Baixo	não tem	Baixo
Privadas secas	95	80	-----	90 - 100	50 - 70	Baixo	Baixo	Médio
Biodigestores (1) <sup>21</sup>	40 - 60	8	40	55	95	Médio	Baixo	Médio
Lagoas facultativas	70 - 85	30 - 50	20 - 60	60 - 99	30 - 80	Médio	Baixo	Alto
Lagoas anaeróbias e facultativas associadas	70 - 90	30 - 50	20 - 60	60 - 99,9	40 - 80	Alto	Baixo	Alto
Lagoas com plantas aquáticas	70 - 90	70 - 90	70 - 90	60 - 99	70 - 95	Médio	Baixo	Baixo

(fonte: adaptado de ERCOLE, 2003)

## 6.2 SELEÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Analisando-se os quadros 1 e 2, marcando-se os melhores resultados em cada requisito, percebe-se que o sistema modular com separação das águas é o único que é contemplado por

<sup>21</sup> Os dados apresentados são os de um decanto-digestor (Tanque Imhoff), de câmaras sobrepostas, ocorrendo na câmara superior a sedimentação dos sólidos e na inferior a digestão destes, com a produção do gás metano.

todos. Considerou-se, como ponto de partida, na escolha dos melhores resultados para os requisitos de:

- a) implantação,
  - área necessária  $\leq 3 \text{ m}^2/\text{hab}$ ;
  - complexidade construtiva baixa;
  - custos de implantação  $\leq 20 \text{ US\$/hab}$ ;
- b) operação,
  - complexidade operativa baixa;
  - tempo de detenção hidráulica  $\leq 2$  dias;
  - quantidade de lodo produzido  $\leq 0,1 \text{ m}^3/(\text{hab.ano})$ ;
  - frequência de remoção de lodo  $> 5$  anos;
  - custos de operação  $\leq 3 \text{ US\$/hab.ano}$ ;
- c) remoções de poluentes,
  - DBO  $\geq 85\%$ ;
  - nitrogênio  $\geq 50\%$ ;
  - fósforo  $\geq 70\%$ ;
  - coliformes totais  $\geq 90\%$ ;
  - sólidos suspensos totais  $\geq 90\%$ ;
- d) perturbações ambientais: todos com níveis baixos

Assim, o sistema de tratamento de esgotos escolhido é o sistema modular com separação das águas. No capítulo seguinte, apresenta-se o dimensionamento deste.



## 7 DIMENSIONAMENTO

A partir da análise dos processos de tratamento de esgotos citados neste trabalho, foi selecionado, como mais adequado, o sistema modular com separação das águas. Assim, neste capítulo, é detalhado o dimensionamento do decantador para as águas cinzas, do reator anaeróbio bicompartimentado para as águas negras e do leito de evapotranspiração para aplicação no Ceres. O sistema foi dimensionado para 30 pessoas, conforme o projeto da residência que será reformada, para a qual está sendo proposto este projeto. Os equipamentos serão construídos com alvenaria. O fundo foi projetado de concreto com espessura de cinco centímetros. As paredes e o fundo dos equipamentos serão revestidos com argamassa impermeável (com aditivo hidrofugante). Todas as tubulações e conexões serão de cerâmica. As águas negras serão conduzidas por tubulações de diâmetro igual a 100 mm, e, as águas cinzas por tubulações de 75 mm.

A caixa de mistura apenas é necessária para contribuições diárias acima de 5 m<sup>3</sup>/dia. Para dimensioná-la, como não existe nenhum padrão de dimensionamento, adota-se um volume mínimo de 20% do volume do decantador. Experiências de pesquisadores mostram que este tem sido suficiente para a homogeneização da mistura (ERCOLE, 2013). Entretanto, como, no caso em questão, a contribuição diária é de 2,25 m<sup>3</sup>/dia, como é mostrado a seguir, não há a necessidade de implantação deste equipamento.

### 7.1 DECANTADOR

Para calcular o volume do decantador foram analisados levantamentos sobre atividades produtoras de águas cinzas nas residências e as quantidades produzidas para cada uma, buscando atender as condições dos tempos de detenção hidráulica que foram mencionadas na descrição do sistema (mínimo de duas horas e máximo de vinte e quatro horas). Como nesta residência apenas está previsto o alojamento das pessoas, foram consideradas apenas as atividades de higiene e de limpeza. Conforme Ercole (2003), abaixo estão apresentadas as quantidades produzidas para cada uma destas, em litros por pessoa:

- a) higiene,

- banho com chuveiro: 45 L/p;
  - lavar as mãos e o rosto: 3 L/p;
  - escovar os dentes: 12 L/p;
  - barbear-se: 12 L/p;
- b) limpeza: 50 L/p.

Para determinar o volume, além de ser necessária uma análise das atividades que consomem mais água, devem-se observar os horários em que estas são realizadas com maior intensidade. Assim, é importante considerar que as atividades de higiene, as quais, juntas, necessitam de mais quantidade de água do que as atividades de limpeza, não ocorrem de forma simultânea com estas. Considerando que o banho com chuveiro e escovar os dentes podem ocorrer de forma simultânea, no horário de maior consumo, que, de acordo com Ercole (2003), é das 18 às 21 horas, o volume total será de 57 L/p. Então, o cálculo do volume do decantador foi realizado pela seguinte equação:

$$V_D = N \times (C / T_{MP}) \times TDH \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$V_D$  = volume útil do decantador;

$N$  = número de contribuintes;

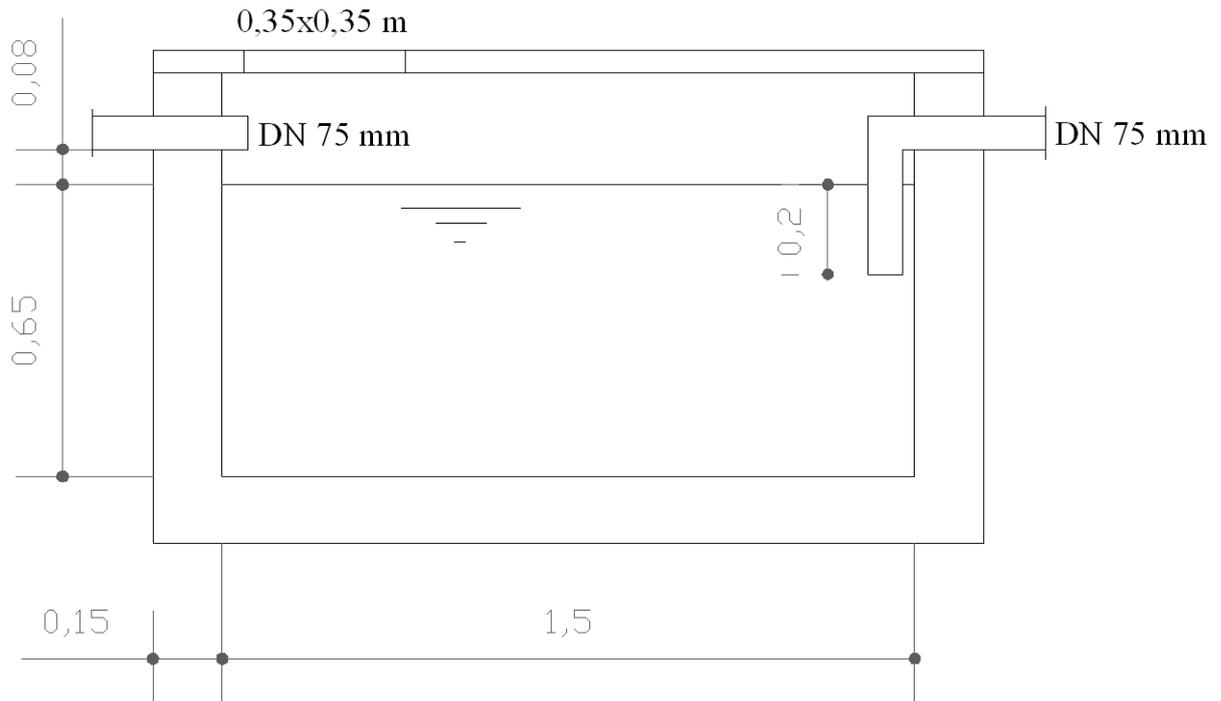
$C$  = contribuição por pessoa de águas cinzas;

$T_{MP}$  = duração do período de maior produção de águas cinzas;

$TDH$  = tempo de detenção hidráulica.

De acordo com a equação 3, o volume útil do decantador é de 855 litros ou 0,855 m<sup>3</sup>, adotando tempo de detenção hidráulica de 2 horas. Na figura 28, encontra-se o detalhamento deste.

Figura 28 – Decantador (dimensões em m)



(fonte: elaborada pela autora)

## 7.2 REATOR ANAERÓBIO BICOMPARTIMENTADO

Conforme já foi citado, o reator anaeróbico bicompartimentado é constituído por um decanto-digestor seguido por um filtro anaeróbio. Abaixo, está apresentado o dimensionamento de cada uma destas partes do reator.

### 7.2.1 Decanto-digestor

De acordo com Andrade Neto et al. (1999a), o cálculo do volume total do decanto-digestor é realizado somando-se o volume necessário para a decantação com o volume para a acumulação de lodo, conforme a equação 4:

$$V_{DD} = V_D + V_L \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$V_{DD}$  = volume do decanto-digestor;

$V_D$  = volume para a decantação;

$V_L$  = volume para a acumulação de lodo.

O volume para a decantação pode ser calculado pela seguinte equação:

$$V_D = N \times C \times T \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$V_D$  = volume para a decantação;

$N$  = número de contribuintes;

$C$  = contribuição de despejos em litros/ (pessoa·dia);

$T$  = tempo necessário para a digestão.

Como os despejos considerados são apenas as águas negras,  $C$  é o consumo diário de água das descargas efetuadas por pessoa. Assim, considerando vasos sanitários com caixa acoplada, que funcionam satisfatoriamente com somente seis litros por descarga e três acionamentos por pessoa, por dia, a contribuição será de 18 litros/(pessoa·dia). Segundo a NBR 7229 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993), o tempo necessário para a digestão é de um dia para volumes de contribuição de até 1500 litros. Então, de acordo com a equação 5, o volume para a decantação é de 540 litros ou 0,54 m<sup>3</sup>.

O volume para a acumulação do lodo é obtido através da soma do volume destinado a digestão do lodo com o volume de armazenamento do lodo digerido, de acordo com a equação abaixo:

$$V_L = V_{DIG} + V_{ARM} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

$V_L$  = volume para a acumulação do lodo;

$V_{DIG}$  = volume destinado à digestão do lodo;

$V_{ARM}$  = volume destinado ao armazenamento do lodo digerido.

O volume necessário para a digestão do lodo é calculado pela equação 7:

$$V_{DIG} = N \times L_f \times R_{DIG} \times T_{DIG} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

$V_{DIG}$  = volume destinado à digestão do lodo;

$N$  = número de pessoas contribuintes;

$L_f$  = contribuição de lodo fresco, em litros/(pessoa·dia);

$R_{DIG}$  = coeficiente de redução do volume de lodo por adensamento e destruição de sólidos na zona de digestão;

$T_{DIG}$  = tempo de digestão do lodo.

Conforme Ercole (2003), como está sendo considerado apenas o despejo das águas negras, deve-se encontrar, na tabela 1 da NBR 7229 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993), o valor de  $L_f$  que mais se aproxime das características desse afluente. O  $L_f$  mais próximo é de 0,2 litro/(pessoa·dia). Segundo esta norma citada, o  $R_{DIG}$  recomendado é de 0,5. De acordo com Andrade Neto et al. (1999a), o  $T_{DIG}$  depende da temperatura, e, no Brasil, tradicionalmente, utiliza-se tempo de digestão de lodo de 50 dias em decanto-digestores. Assim, o  $V_{DIG}$  é de 150 litros ou 0,15 m<sup>3</sup>.

O volume de armazenamento do lodo depende fundamentalmente do período entre esgotamentos da unidade e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$V_{\text{ARM}} = N \times L_f \times R_{\text{ARM}} \times T_{\text{ARM}} \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

$V_{\text{ARM}}$  = volume de armazenamento do lodo;

$N$  = número de contribuintes;

$L_f$  = contribuição de lodo fresco em litros/(pessoa·dia);

$R_{\text{ARM}}$  = coeficiente de redução do volume de lodo devido à digestão;

$T_{\text{ARM}}$  = tempo de armazenamento dos lodos digeridos.

Segundo a NBR 7229 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993), recomenda-se que o valor de  $R_{\text{ARM}}$  deve ser de 0,25. Para Andrade Neto et al. (1999a), o tempo de armazenamento dos lodos digeridos é o tempo previsto para a remoção do lodo menos o tempo de digestão do lodo. De acordo com Ercole (2003), no caso do decanto-digestor do sistema modular com separação das águas, o período de remoção de lodo é de 3650 dias. Portanto, o volume de armazenamento é de 5475 litros ou 5,475 m<sup>3</sup>. E, então, o volume para a acumulação de lodo é de 5,625 m<sup>3</sup>.

De acordo com a equação 4, o volume total do decanto-digestor é de 6,165 m<sup>3</sup>. Algumas considerações devem ser feitas a respeito das dimensões deste e da sua construção. Segundo Andrade Neto et al. (1999a), quanto maior a área de base, melhor será o desempenho devido à maior superfície de contato entre a biomassa decantada e a fase líquida, favorecendo processos da digestão do lodo. Assim, embora a NBR 7229 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993) recomende alturas úteis de 1,2 a 2,2 m, para até 6 m<sup>3</sup>, como este decanto-digestor é dimensionado somente para as águas negras, baseada em Cardão (1972), utiliza-se uma altura mínima útil de 0,95 m. O espaço entre o nível da água e a parte inferior da tampa do decanto-digestor, conforme a norma citada acima, deve ser de 0,25 m. Esta mesma norma recomenda que a largura interna mínima seja de 0,8 m. De acordo com Ercole (2003), levando em consideração que somente foi dimensionado para o despejo proveniente dos vasos sanitários, a relação largura x comprimento mais adequada para este equipamento é de 1 x 1,5. Para Gasi (1988), o esgoto deve ser lançado a 0,35 m do fundo do equipamento, utilizando um prolongador, pois a concentração das bactérias é maior nessa região, favorecendo a homogeneização do líquido e aumentando a velocidade de digestão do esgoto.

### 7.2.2 Filtro Anaeróbio

Segundo a NBR 13969 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), o volume útil do leito filtrante pode ser calculado através da seguinte equação:

$$V_U = 1,6 \times N \times C \times T \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

$V_U$  = volume útil do leito filtrante;

$N$  = número de contribuintes;

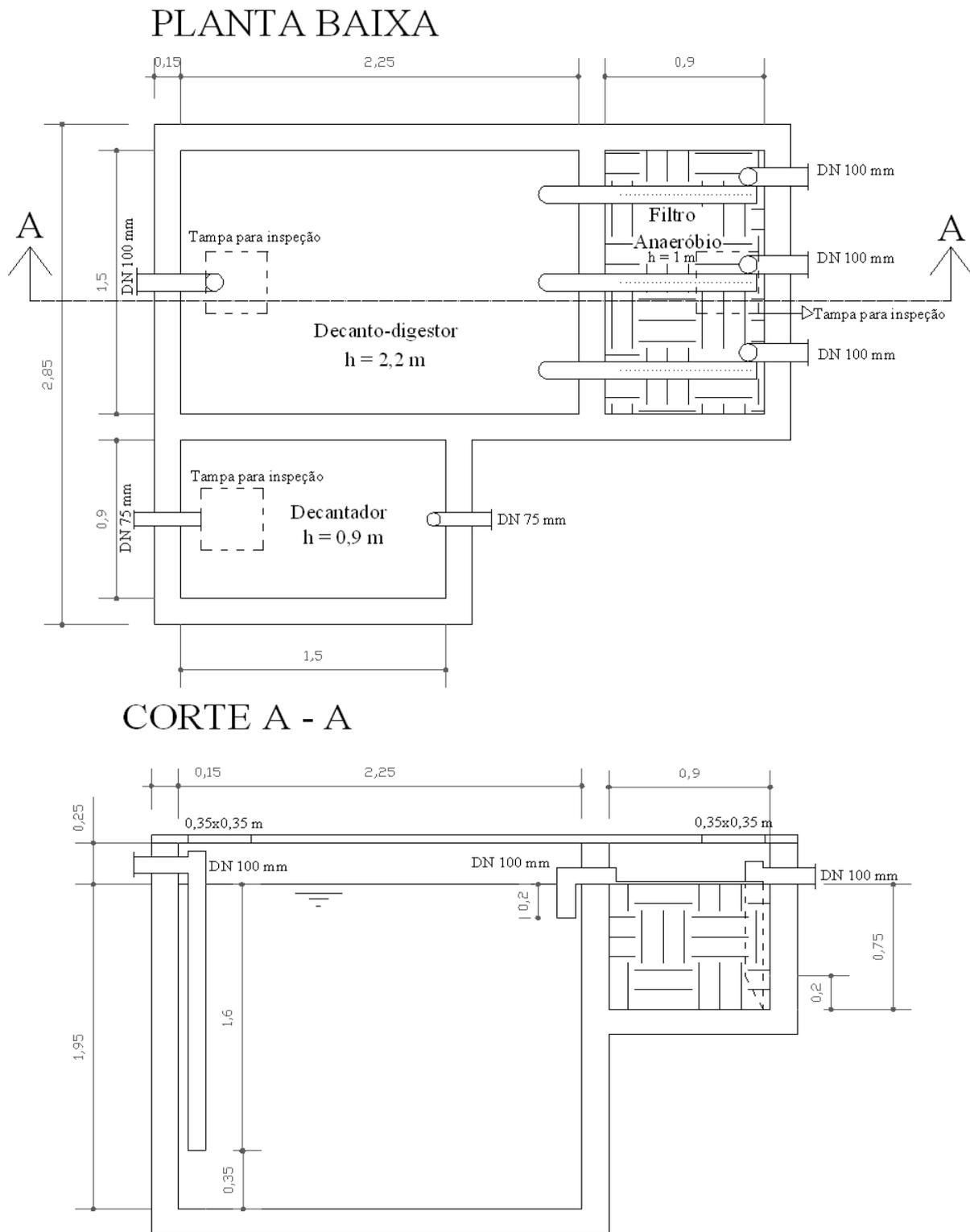
$C$  = contribuição de despejos, em litros/ (pessoa·dia);

$T$  = tempo de detenção hidráulica.

A contribuição será de 18 litros/ (pessoa·dia), como já foi citado antes. Segundo a norma citada acima, o tempo de detenção hidráulica, para vazões menores que 1,5 m<sup>3</sup>/dia e temperatura média do mês mais frio abaixo de 15°C, é de 28 horas. Assim, o volume útil do leito filtrante é de 1008,3 litros ou 1 m<sup>3</sup>, conforme a equação 9. Esta mesma norma recomenda que a altura do meio suporte dos filtros não deve ser maior que 1,2 m e nem menor que 0,6 m. O material de enchimento do leito filtrante será conduíte cortado (anéis de eletroduto corrugado de plástico). Além de ser um material residual da construção civil, de acordo com Andrade Neto et al. (2001), é uma boa opção, pois: “[...] é leve, resistente e durável; propicia enormes facilidades de operação; tem grande área superficial específica e índice de vazios que facilita a acumulação de grandes quantidades de lodo; apresenta baixo risco de obstrução; e é de fácil aquisição e manejo.”. O filtro será de fluxo descendente, pois possui menor risco de entupimento.

A figura 29 mostra a planta do conjunto de todos os equipamentos calculados até agora. Além disto, apresenta o detalhamento do reator anaeróbio no corte AA.

Figura 29 – Reator anaeróbio e decantador (dimensões em metro)



(fonte: elaborada pela autora)

### 7.3 LEITO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E LEITO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E INFILTRAÇÃO

Segundo Ercole (2003), o cálculo da área necessária para o leito de evapotranspiração, o qual possui o fundo e as laterais impermeabilizadas, pode ser realizado pela equação 10:

$$A = V_C / V_E \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

A = área necessária para o leito em m<sup>2</sup>;

V<sub>C</sub> = volume de contribuição diária total em litros/dia;

V<sub>E</sub> = volume de evapotranspiração em litros/(m<sup>2</sup>·dia).

O leito de evapotranspiração e infiltração, o qual é considerado mais vantajoso quando o nível do lençol freático está a mais de 1 m da superfície, pode ser calculado segundo a equação 11.

$$A = V_C / (V_E + V_I) \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

A = área necessária para o leito em m<sup>2</sup>;

V<sub>C</sub> = volume de contribuição diária total em litros/dia;

V<sub>E</sub> = volume de evapotranspiração em litros/(m<sup>2</sup>·dia);

V<sub>I</sub> = volume de infiltração em litros/(m<sup>2</sup>·dia).

Os volumes de evapotranspiração e de infiltração estão nas tabelas 1 e 2, respectivamente:

Tabela 1 – Taxas de evapotranspiração em função das temperaturas médias

TEMPERATURAS MÉDIAS (°C)	TAXA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO (litros/m <sup>2</sup> )
T < 15	5
15 ≤ T ≤ 25	35
T > 25	70

(fonte: adaptado de ERCOLE, 2003, p. 149)

Tabela 2 – Coeficientes de infiltração em função da constituição provável do solo

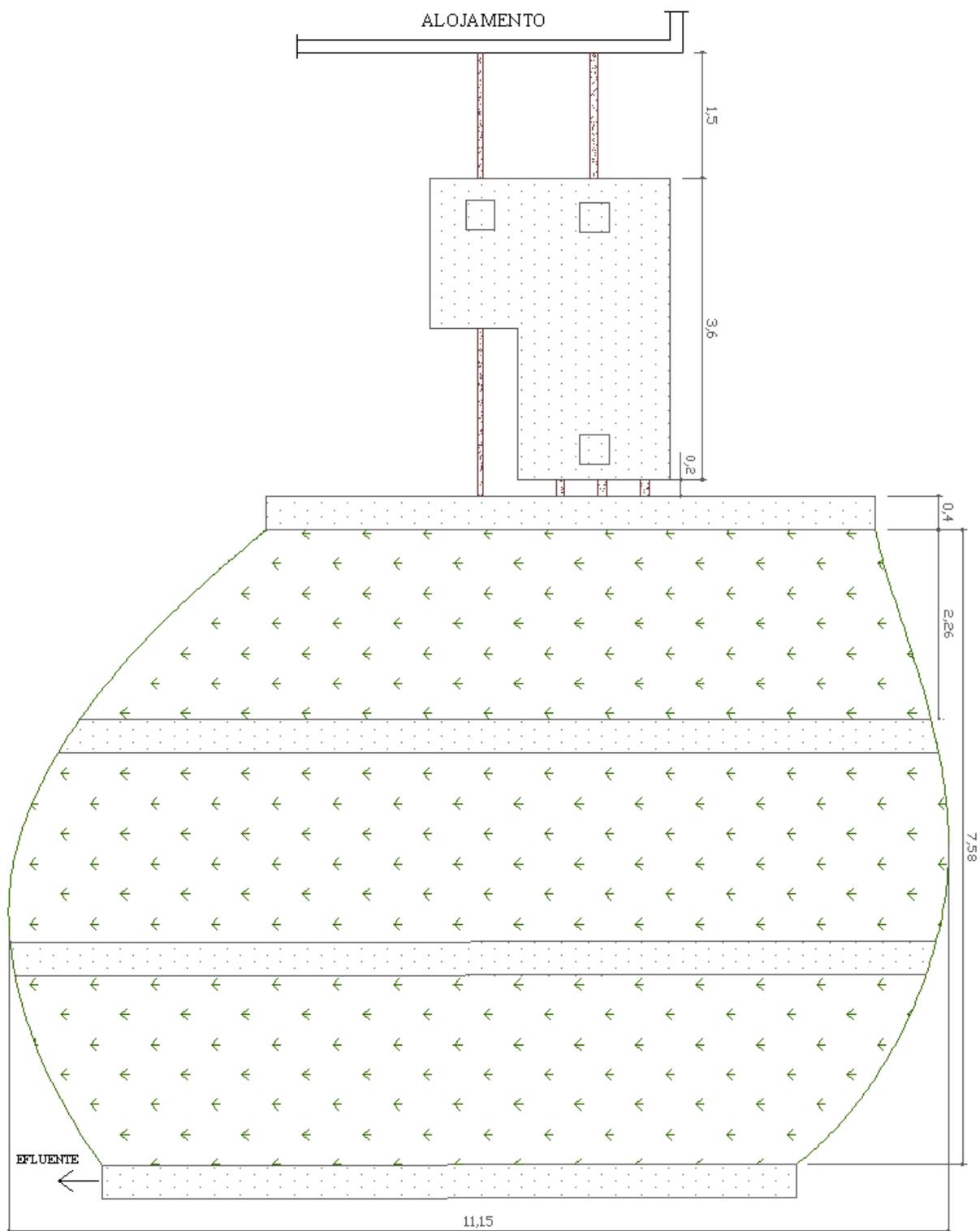
FAIXA	CONSTITUIÇÃO PROVÁVEL DO SOLO	VOLUME DE INFILTRAÇÃO (litros/(m <sup>2</sup> ·dia))
1	Rochas, argilas compactas de cor branca, cinza ou preta, variando a rochas alteradas medianamente compactas de cor avermelhada	> 20
2	Argilas de cor amarela, vermelha ou marrom, medianamente compacta, variando a argilas pouco siltosas e/ou arenosas	20 a 40
3	Argilas arenosas e/ou siltosas, variando a areia argilosa ou silte argiloso de cor amarela, vermelha ou marrom	40 a 60
4	Areia ou silte argiloso, ou solo arenoso com húmus e turfas, variando a solos constituídos predominantemente de areias e siltes	60 a 90
5	Areia bem selecionada e limpa, variando a areia grossa com cascalhos	< 90

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993)

Como não se realizou nenhum ensaio de reconhecimento do solo e do nível do lençol freático, foi proposto o leito de evapotranspiração. Considerando a temperatura média de Feliz entre 15°C e 25°C, de acordo com a equação 10, a área necessária para o LET é de 64,3 m<sup>2</sup>. As paredes e o fundo serão impermeabilizados com argamassa impermeável (com aditivo hidrofugante). A proposta da forma do leito é a realização de degraus conforme a declividade do terreno, proporcionando uma forma orgânica e menos impactante, e, no seu interior, uma estrutura semelhante à figura 12, na página 49. Devido ao fato de não existir ainda o levantamento topográfico, não foi possível detalhar a conformação deste. Contudo, as figuras 30 e 31, ilustram a idéia de como será executado o LET. A vegetação a ser aplicada pode ser qualquer das recomendadas na página 49, mas com o cuidado de que o início do leito terá maior volume de água, necessitando de uma vegetação mais resistente ao excesso desta.

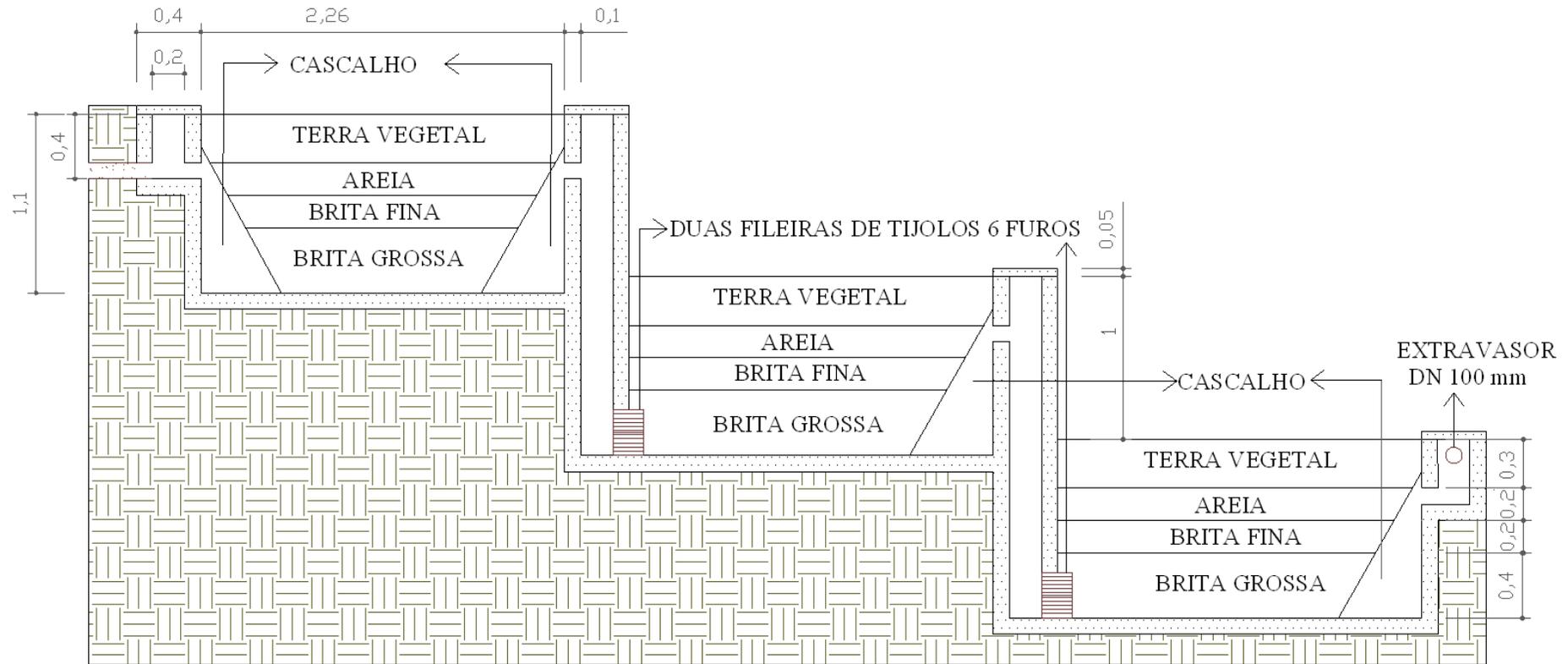
Segundo experiências de pesquisadores, a própria natureza vai se adaptando a fatores como esse. A eventual água excedente do sistema pode ser canalizada para irrigação de outras plantas, para o rio existente no terreno ou pode ser direcionada para um tanque de criação de peixes.

Figura 30 – Esquema da proposta de projeto de tratamento de esgotos completa (dimensões em metro)



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 31 – Degraus do LET (dimensões em metro)



(fonte: elaborado pela autora)



## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo Ercole (2003), é recomendado que se realize o monitoramento do reator anaeróbio, pois o dimensionamento foi realizado conforme reatores convencionais, e, no caso em questão, são consideradas somente as águas negras. Esta monitoração deve ser feita num período de no mínimo cinco anos, e deve ser analisada a capacidade depurativa do reator quanto às remoções de DBO, nitrogênio, fósforo, sólidos suspensos totais, coliformes fecais e a quantidade de lodo produzido.

Este mesmo autor recomenda, também, que sejam realizadas análises das camadas de solo, no caso de uso do LETI, de um a dez metros, com o objetivo de se verificar as concentrações de DBO, nitrogênio, fósforo, sólidos suspensos totais e coliformes fecais. Além destas, deve-se analisar a vegetação que se desenvolve no leito quanto a eventuais contaminações químicas e biológicas.

O impacto ambiental do uso de água no processo de despejo de esgotos é bastante grande. Almejando diminuir este impacto, será realizada a captação da água da chuva, para utilização nos vasos sanitários. O método de tratamento com privadas secas seria o mais adequado para esta questão. Entretanto, analisando-se todos os requisitos, o sistema modular com separação das águas mostrou-se mais adequado, neste caso, nos requisitos de custos de implantação, complexidade operativa, remoção de sólidos suspensos totais e possibilidade de desenvolvimento de insetos e vermes. Quanto à área, requisita maior disponibilidade, pois tem a necessidade de local para a disposição do composto gerado. Além disso, teria que ser realizado um sistema de tratamento à parte para as águas cinzas.

Os vasos sanitários que serão utilizados no banheiro serão vasos com separação de urina. Assim, a urina pode ser diluída e utilizada como fertilizante diretamente no leito ou em outros cultivos.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.229**: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. **NBR 13.969**: Tanques sépticos - unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

ANDRADE NETO, C. O. de; ALÉM SOBRINHO, P.; MELO, H. N. de S.; AISSE, M. M. Decanto-Digestores. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999a. p. 117-138.

ANDRADE NETO, C. O. de; CAMPOS, J. R.; ALÉM SOBRINHO, P.; CHERNICHARO, C. A. de L.; NOUR, E. A. Filtros anaeróbios. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999b. p. 139-154.

ANDRADE NETO, C. O. de; MELO, H. N. de S.; LUCAS FILHO, M. Análise comparativa de filtros anaeróbios com fluxo ascendente e fluxo descendente afogado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: ABES, 2001. Não paginado. 1 CD-ROM.

CARDÃO, C. **Instalações domiciliares**. 6 ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 1972.

CORAUCCI FILHO, B.; CHERNICHARO, C. A. L.; ANDRADE NETO, C. O. de; NOUR, E. A.; ANDREOLI, F. De N.; SOUZA, H. N. de; MONTEGGIA, L. O.; VON SPERLING, M.; FILHO, M. L.; AISSE, M. M.; FIGUEIREDO, R. F. de; STEFANUTTI, R. Tecnologia do tratamento de águas residuárias no solo: infiltração rápida, irrigação e escoamento superficial. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 357-407.

DEL PORTO, D.; STEINFELD, C. **The composting toilet system book**: a practical guide to choosing, planning and maintaining composting toilet systems, an alternative to sewer and septic systems. 1st ed. rev. Concord: Center for Ecological Pollution Prevention, c2000.

ERCOLE, L. A. dos S. **Sistema modular de gestão de águas residuárias domiciliares**: uma opção mais sustentável para a gestão de resíduos líquidos. 2003. 192 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2003.

ERCOLE, L. A. dos S. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <eaercole@terra.com.br> em 5 jun. 2013.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 29-52.

GALBIATI, A. F. **Tratamento domiciliar de águas negras através de tanque de evapotranspiração**. 2009. 38 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

GASI, T. M. T. **Opções para tratamento de esgotos de pequenas comunidades**. São Paulo: CETESB, 1988. Séries Manuais.

KATO, M. T.; ANDRADE NETO, C. O. de; CHERNICHARO, C. A. de L.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. Configurações de reatores anaeróbios. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 53-99.

MARS, R. **O design básico em permacultura**. Porto Alegre: Via Sapiens, 2008.

MARQUES, D. da M. Terras úmidas construídas de fluxo subsuperficial. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 409-435.

MASCARÓ, J. L.; AZAMBUJA; G. B. de. **Sustentabilidade em urbanizações de pequeno porte**. Porto Alegre: Masquatro, 2010.

OTTERPOHL, R.; BRAUN, U.; OLDENBURG, M. **Innovative technologies for decentralised wastewater management in urban and peri-urban areas**. In: SPECIALISED CONFERENCE ON SMALL WATER AND WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS, 2002, Istanbul. **Proceedings...** London: IWA Publishing, 2003. p. 27-36. Disponível em: <[http://www.netssaftutorial.com/fileadmin/DATA\\_CD/04\\_Step4/SE15.\\_Innovative\\_techs\\_for\\_decentralised\\_wastewater\\_management.pdf](http://www.netssaftutorial.com/fileadmin/DATA_CD/04_Step4/SE15._Innovative_techs_for_decentralised_wastewater_management.pdf)>. Acesso em: 9 maio 2013.

TODD, N. J.; TODD, J. **From eco-cities to living machines: principles of ecological design**. Berkeley: North Atlantic Books, c1994.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 1995. v. 1.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lagoas de estabilização**. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2000. v. 3.

VON SPERLING, M.; ANDRADE NETO, C. O. de; VOLSCHAN JÚNIOR, I.; FLORÊNCIO, L. Impacto dos nutrientes do esgoto lançado em corpos de água. In: VON SPERLING, M.; MOTA, F. S. B. (Coord.). **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 26-51.

WINBLAD, U.; KILAMA, W. **Sanitation without water**. 1. ed. rev. and enl. London: Macmillan, 1985.