

**UTILIZAÇÃO DE DIGESTORES ANAERÓBIOS PARA  
O TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS URBANOS COM  
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM  
FLORIANÓPOLIS, SC**

Lúcio Costa Proença

Orientador: Armando Borges de Castilhos Júnior

2010/2

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL**

Lúcio Costa Proença

**UTILIZAÇÃO DE DIGESTORES ANAERÓBIOS PARA O  
TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS URBANOS COM  
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM  
FLORIANÓPOLIS, SC**

Trabalho submetido à Universidade  
Federal de Santa Catarina para a  
Conclusão do Curso de Engenharia  
Sanitária e Ambiental  
Orientador: Prof. Dr. Armando Borges  
de Castilhos Júnior

Florianópolis  
Março de 2011

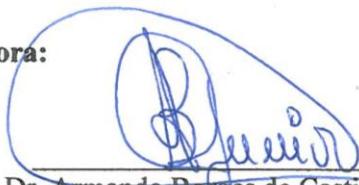
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

UTILIZAÇÃO DE DIGESTORES ANAERÓBIOS PARA O  
TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS URBANOS COM  
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

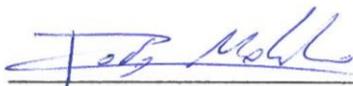
Lúcio Costa Proença

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos  
requisitos para a conclusão do Curso de Engenharia Sanitária e  
Ambiental- TCC II

**Banca Examinadora:**



Prof., Dr. Armando Borges de Castilhos Júnior,  
(Orientador)



Dr. Rodrigo de Almeida Mohedano,  
(Membro da Banca)



Eng. Wanderli Rogério Moreira Leite  
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS  
MARÇO/2011

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente à minha família, por todo o amor, apoio e orientação em todos os aspectos da minha vida.

À empresa Waterleau, que me recebeu como estagiário e me permitiu entrar em contato pela primeira vez com o tema deste trabalho. Ao engenheiro Johan Windels, por toda a experiência transmitida e pela dedicação em me orientar quanto à parte técnica do dimensionamento de digestores de resíduos.

Ao Professor Armando Borges de Castilhos Júnior, pela orientação deste trabalho.

Ao povo brasileiro, que permitiu que eu realizasse toda a minha educação formal em instituições de ensino públicas, gratuitas e de qualidade.

Não há abundância que justifique o desperdício.

(Anônimo)

## RESUMO

O gerenciamento adequado dos resíduos sólidos consiste em um dos maiores desafios ambientais atuais. Em um contexto de crescentes restrições ambientais quanto aos métodos de disposição de resíduos, a utilização de digestores anaeróbios no tratamento de resíduos orgânicos aparece como uma alternativa promissora. Este método promove a estabilização dos resíduos orgânicos, que correspondem à metade dos resíduos urbanos no Brasil, dispensando a necessidade de sua disposição em aterros sanitários e gerando um combustível renovável durante o processo: o biogás. Este trabalho apresenta um estudo preliminar sobre a viabilidade da utilização de digestores anaeróbios para tratar a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos no município de Florianópolis, SC. O estudo consistiu em uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, seguida de uma projeção para Florianópolis, SC, composta de dimensionamento simplificado do sistema, estimativa de custos e receitas do projeto e comparação entre o método proposto e o aterramento sanitário praticado atualmente. O dimensionamento apontou para a necessidade de instalação de um digestor de  $7.748\text{m}^3$ , a um custo de instalação estimado em 15 milhões de reais, com o potencial de gerar 2,3 MW de energia elétrica a partir de biogás. Estimou-se um custo de tratamento de resíduos em torno de R\$121,00 por tonelada, que conjugados às vantagens ambientais da digestão anaeróbia, apontam para a viabilidade da adoção deste método de tratamento no município analisado.

**Palavras-chave:** tratamento de resíduos orgânicos, digestores anaeróbios, produção de biogás.

## ABSTRACT

Waste management is one of the greatest challenges of our times. In the context of increasing environmental restrictions regarding waste disposal, the use of anaerobic digestors to treat organic waste arises as a promising alternative. This method allows the stabilization of organic waste, which represents half of the urban waste produced in Brazil, avoiding its disposal in sanitary landfills and producing a renewable energy source, i.e., biogas. This work presents a preliminary study about the feasibility of using a biogas plant to treat organic waste in the city of Florianópolis, SC. Methodology consists in bibliographic review about anaerobic digestion, a preliminary dimensioning, costs estimation and comparison between anaerobic digestion and the current disposal methods (sanitary landfilling). Results of the dimensioning indicated the need of a digester with 7,748 m<sup>3</sup>, with an estimated cost of R\$15 million and with a potential to generate 2.3 MW of electricity from biogas. A treatment cost of R\$121 per ton of organic waste was estimated, which indicates that, considering its environmental advantages, the Project is feasible for the city of Florianópolis.

**Keywords:** organic waste treatment, anaerobic digestors, biogas plant, biogas production.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1- Matriz de decisão do Projeto Ecoparque (adaptado de Reichert et al. (2004) .....	30
Tabela 4. 1- Estimativa de geração anual de resíduos sólidos orgânicos (2011 a 2021).....	43
Tabela 4. 2- Parâmetros adotados no dimensionamento do digestor .....	44
Tabela 4. 3- Parâmetros calculados do projeto Florianópolis .....	45
Tabela 4. 4 – Custos de instalação do Projeto Ecoparque.....	47
Tabela 4. 5 – Valores de referência para estimativa de custos segundo Deublein e Steinhauser (2008) .....	47
Tabela 4. 6 – Custos de instalação do projeto Florianópolis.....	48
Tabela 4. 7 – Custos de operação do projeto Ecoparque .....	49
Tabela 4. 8 - Estimativa de custos de operação do Projeto Florianópolis a partir dos custos do Projeto Ecoparque .....	49
Tabela 4. 9 – Receitas operacionais do projeto Florianópolis .....	50
Tabela 4. 10 – Cálculo da taxa mínima a ser cobrada pelo tratamento de resíduos do projeto Florianópolis .....	51

## LISTA DE SÍMBOLOS

ST – sólidos totais  
GRO- geração resíduos sólidos orgânicos  
SV – sólidos voláteis  
DQO – demanda química de oxigênio  
 $L_{\text{diluição}}$  – quantidade de líquido de diluição  
 $V_{\text{digestor}}$  – volume do digestor  
 $V_s$  – volume de substrato  
TDH – tempo de detenção hidráulica  
 $V_{\text{metano}}$  – volume de metano gerado  
PE – potencial energético

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 Objetivo geral .....	11
1.2 Objetivos específicos .....	11
1.3 Finalidade .....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1. Resíduos sólidos urbanos (rsu) .....	14
2.2. Tratamento de resíduos orgânicos.....	16
2.3. Digestão anaeróbia.....	17
2.4. Tecnologias de digestores disponíveis .....	21
2.5. Experiências de digestores anaeróbios de resíduos orgânicos.....	22
2.6. Aspectos econômicos.....	27
2.7. Aspectos ambientais .....	32
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
3.1. Estado da arte da utilização de digestores anaeróbios de resíduos orgânicos .....	35
3.2. Geração de resíduos orgânicos de Florianópolis.....	35
3.3. Dimensionamento dos digestores.....	37
3.4. Estimativa da produção de biogás.....	38
3.5. Estimativa de custos e receitas do projeto Florianópolis.....	39
3.6. Comparação de custos entre digestores anaeróbios e aterros sanitários.....	41
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>43</b>
4.1. Estimativa de geração de resíduos para o período 2011 – 2021 em Florianópolis.....	43
4.2. Dimensionamento dos digestores para Florianópolis.....	44
4.3. Estimativa da produção de biogás em Florianópolis.....	45
4.4. Estimativa de custos da adoção de digestores anaeróbios em Florianópolis.....	46
4.5. Comparação de custos entre digestores anaeróbios e aterros sanitários em Florianópolis.....	50
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento adequado dos resíduos sólidos consiste em um dos maiores desafios ambientais de nossos tempos. No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece que a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos devem obedecer à seguinte prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos. Após a aplicação destes princípios, os resíduos remanescentes devem ser direcionados para um modo de disposição final (BRASIL, 2010).

Estudos têm estimado que metade dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil consiste em resíduos orgânicos. Em sua maior parte, estes resíduos são dispostos em locais inapropriados (lixões a céu aberto ou aterros controlados). Uma pequena fração é disposta em aterros sanitários e uma fração ainda menor é destinada ao processo de compostagem. Os crescentes desafios ambientais enfrentados por nossa sociedade evidenciam a necessidade de estabelecer padrões ambientais cada vez mais rígidos para as atividades antrópicas, minimizando ao máximo os impactos ambientais delas decorrentes. No âmbito da gestão dos resíduos sólidos, faz-se necessária a adoção de métodos de tratamento que busquem recuperar os materiais descartados, reduzindo continuamente o volume de resíduos que devem ser dispostos em aterros sanitários ou incinerados (IPT/CEMPRE;2000).

A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos é composta basicamente por restos de alimentos, que podem ser naturalmente degradados por microorganismos. Quando este processo de degradação ocorre na ausência de oxigênio, é denominado digestão anaeróbia. A digestão anaeróbia vem sendo adotada no Brasil para tratar alguns tipos de efluentes agropecuários, como os efluentes de suinocultura, mas sua aplicação no tratamento de resíduos urbanos ainda é novidade. A principal vantagem deste método está em permitir a recuperação de todo o resíduo orgânico descartado, que é transformado em composto para agricultura, gerando durante o processo um combustível renovável, o biogás. Esta forma de tratamento se aproxima da ideia de um ciclo fechado na gestão de resíduos, aproveitando todos os subprodutos gerados durante o processo. O tratamento de resíduos orgânicos por digestão anaeróbia já é aplicado em larga escala em países como Dinamarca, Suécia e Alemanha (AL SEADI et al., 2008).

Neste caso, o tratamento dos resíduos orgânicos se configura como uma fonte de energia renovável, aproveitando a energia solar armazenada quimicamente nos vegetais (por meio dos processos

fotossintéticos) na queima do biogás. A queima de gás metano gera como subproduto o gás carbônico, diminuindo a contribuição antropogênica para o aumento do efeito estufa, uma vez que o gás metano contribui em torno de 20 vezes mais para o aquecimento global do que o gás carbônico (AL SEADI et al., 2008; REICHERT et al., 2004).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo preliminar sobre a viabilidade da utilização de digestores anaeróbios para tratar a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos no município de Florianópolis.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Estabelecer o estado da arte da utilização de digestores anaeróbios no tratamento de resíduos orgânicos no mundo.
- b) Dimensionar digestores para tratar os resíduos orgânicos do município de Florianópolis, baseado nas tecnologias disponíveis.
- c) Calcular a produção teórica de biogás e avaliar seu aproveitamento energético no município de Florianópolis.
- d) Avaliar as opções de destinação dos subprodutos gerados durante a digestão anaeróbia (biogás, efluente, rejeitos sólidos) no município de Florianópolis.
- e) Comparar o tratamento dos resíduos orgânicos de Florianópolis em digestores anaeróbios com a disposição em aterros sanitários sob os aspectos ambientais, energéticos e econômicos.

### 1.3. FINALIDADE

Sintetizar os conhecimentos e experiências existentes sobre a utilização de biodigestores no tratamento de resíduos orgânicos, apresentando um estudo preliminar sobre a adoção desta técnica para o município de Florianópolis. Pretende-se auxiliar a tomada de decisão sobre métodos mais sustentáveis de destinação final de resíduos orgânicos.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)**

Resíduo sólido consiste em todo o material sólido ou semi-sólido descartado por atividades antrópicas (WEINER; MATTHEWS, 2003). No Brasil, os resíduos sólidos podem ser classificados em três classes, segundo a norma técnica NBR 10004/04 (ABNT, 2004):

- a) resíduos classe I- perigosos: representam risco à saúde pública e/ou ao meio ambiente por suas características relativas a inflamabilidade, patogenicidade, toxicidade, reatividade ou corrosividade.
- b) resíduos classe II A- não perigosos não-inertes: não se enquadram como resíduos de classe I ou II B e podem possuir propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.
- c) resíduos classe II B- não perigosos inertes: não são solubilizados em água, segundo amostragem e ensaio padrões previstos em norma.

#### **2.1.1. Métodos de tratamento e disposição final de RSU**

Os métodos mais difundidos de disposição final de RSU consistem nos aterros sanitários e nos incineradores. Além destes métodos de disposição final, faz-se uso também de métodos de recuperação de resíduos para evitar sua disposição final, destacando-se a reciclagem de materiais e a estabilização de resíduos orgânicos (compostagem e digestão anaeróbia).

a) aterros:

O método de disposição final de resíduos em aterros sanitários consiste no confinamento dos resíduos no solo, sob condições normatizadas e controladas, de forma a minimizar a poluição ambiental e os riscos de saúde pública. Segundo Weiner e Matthews (2003), este método de disposição foi desenvolvido principalmente a partir da segunda metade do século XX. Os resíduos são descarregados no local apropriado do aterro (impermeabilizado), onde são compactados e recobertos por uma camada de solo compactado. O líquido que percola

nas camadas do aterro (denominado chorume ou lixiviado) é coletado e tratado. O biogás gerado pela decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos também é captado e queimado, de modo a evitar explosões. Recentemente, tem-se desenvolvido o aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários, inclusive no Brasil (MCT, 2011).

#### b) incineração

Bidone (2001) considera a incineração como o mais representativo dos tratamentos térmicos de resíduos. Seu objetivo é a redução do volume e da periculosidade de resíduos por meio da combustão controlada. Entre os principais parâmetros de combustão intervenientes no processo destacam-se: poder calorífico, teor em água, teor em inertes, estado físico e granulometria/viscosidade. Este método não consiste em uma prática corrente no Brasil, onde predominam os aterros sanitários, sendo aqui utilizado basicamente no tratamento de resíduos de saúde.

#### c) reciclagem

Segundo Weiner e Matthews (2003), a reciclagem consiste na coleta e reintrodução de materiais no processo produtivo. Os materiais passíveis de serem reciclados em determinada localidade dependem do mercado estabelecido para este tipo de produto. Em geral, os materiais com mercado estabelecido consistem em metais (principalmente alumínio), vidros, plásticos e papéis. A implantação de programas de coleta seletiva em municípios deve levar em conta o potencial de mercado dos diferentes tipos de materiais recicláveis, de forma a assegurar a sustentabilidade do sistema proposto. Entre os vários benefícios da reciclagem destacam-se: diminuição da quantidade de resíduos a serem aterrados, preservação de recursos naturais, economia de energia, diminuição de impactos ambientais, geração de novos negócios com geração de empregos diretos e indiretos (IPT/CEMPRE;2000).

#### d) compostagem

A compostagem consiste no processo de estabilização de resíduos orgânicos por meio da ação de microorganismos aeróbios (Bidone; 2001). Este processo pode ocorrer de forma espontânea no ambiente, mas métodos foram desenvolvidos para acelerar o processo e garantir a qualidade do composto. O principal método adotado no Brasil consiste na disposição dos resíduos em leiras estáticas, que são revolvidas periodicamente para garantir as condições aeróbias de degradação. Um

método semelhante consiste na aeração artificial por tubulações de ar introduzidas nas leiras (leiras estáticas aeradas). Outro método, mais sofisticado, realiza a compostagem dentro de túneis, que podem tanto revolver o composto quanto aerá-lo artificialmente. De modo geral, quanto mais sofisticado o método, maiores os custos de instalação e operação, bem como melhor o controle sobre o processo e sobre a qualidade final do composto (RECHERT et al.; 2004).

#### e) digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é o processo análogo à compostagem, mas realizado em condições anaeróbias. Este processo ocorre de forma natural em aterros sanitários. Quando realizado em reatores (digestores anaeróbios), permite um melhor controle do processo e recuperação de subprodutos, como o composto estabilizado e, principalmente, o biogás. Os países líderes na utilização de digestores anaeróbios no tratamento de resíduos orgânicos são nações européias, como Alemanha, Dinamarca e Suécia, que utilizam o biogás para geração de energia elétrica, calefação e como combustível automotivo (AL SEADI et al., 2008).

## 2.2. TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

Os resíduos sólidos que possuem fração orgânica superior a 30% são denominados resíduos sólidos orgânicos (CASSINI, 2003). No Brasil, os resíduos orgânicos representam em torno de 50% dos resíduos urbanos coletados (PHILIPPI JÚNIOR apud IPT/CEMPRE, 2000).

Segundo Al Seadi et al. (2008), os principais tipos de resíduos orgânicos são:

- a) dejetos de criações de animais (ex.: dejetos da suinocultura, bovinocultura, avicultura);
- b) lodos de tratamento de efluentes (ex.: lodos de tanques sépticos e de Estações de Tratamento de Efluentes, ETES);
- c) resíduos de processos industriais (especialmente da indústria alimentícia);
- d) resíduos orgânicos domésticos (constituído sobretudo de restos de alimentos).

Segundo IBGE (2002), do total de resíduos coletados no País (230.000 t/dia), 47,1% são dispostos em aterros sanitários, 22,3% em

aterros controlados e 30,5% em lixões. Atualmente no Brasil, entre as alternativas disponíveis, o aterro sanitário é aceito como a destinação final de resíduos mais adequada. Esta forma de disposição não consiste, no entanto, em solução final para o problema de destinação de resíduos. Segundo Weiner e Matthews (2003), os custos operacionais de aterros sanitários se elevam continuamente e a disponibilidade de áreas para estas instalações é cada vez mais escassa, levando os resíduos a serem transportados a distâncias cada vez maiores para serem dispostos. Al Seadi et al. (2008) acrescentam que a evolução dos padrões ambientais para disposição final de resíduos, bem como a necessidade da recuperação e da reciclagem de materiais têm contribuído para a busca de alternativas para a disposição de resíduos em aterros sanitários e incineração.

### 2.3. DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia da matéria orgânica consiste em um processo desenvolvido por um conjunto de microorganismos em condições de ausência de oxigênio. Segundo Wiesmann et al. (2007), três grupos de bactérias são os principais responsáveis por este processo: acidogênicas, acetogênicas e metanogênicas. Estes grupos de bactérias ilustram igualmente as três etapas da digestão anaeróbia, embora alguns autores considerem a hidrólise como a primeira de quatro etapas.

As bactérias acidogênicas promovem a hidrólise de partículas sólidas orgânicas pela liberação de enzimas. Desta forma, carboidratos são transformados em mono- e di-sacarídeos, proteínas quebram-se em aminoácidos e lipídios em ácidos graxos. Estes processos resultam ainda na liberação de CO<sub>2</sub> (gás carbônico) e H<sub>2</sub> (gás hidrogênio).

Na fase acetogênica, ácidos graxos mais leves são transformados em acetatos, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. Em um processo balanceado, aproximadamente 50% dos monômeros e ácidos graxos de cadeia longa são quebrados em ácido acético, 20% são convertidos em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> e 30% são convertidos em ácidos graxos voláteis de cadeia curta.

Na fase metanogênica, o H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e acetatos gerados nas fases anteriores são utilizados no metabolismo bacteriano, gerando como principal subproduto o CH<sub>4</sub> (gás metano). Dois grupos de bactérias atuam nesta etapa, um degradando os acetatos (responsável por 70% do metano gerado) e outro consumindo CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> (responsável por 30% do metano gerado). As bactérias metanogênicas são frequentemente o fator

limitante do processo, uma vez que sua taxa de crescimento é menor, comparada com os outros grupos de bactérias atuantes (JØRGENSEN, 2009). A Figura 2.1 ilustra as etapas do processo de digestão anaeróbia.

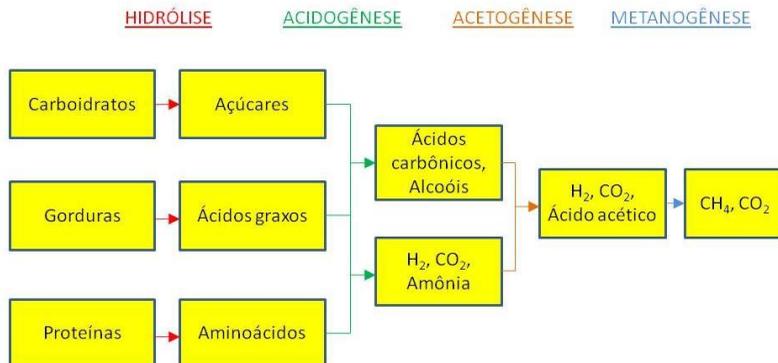


Figura 2. 1 Etapas da digestão anaeróbia (adaptado de Jørgensen, 2009)

Nos itens subsequentes, estão descritos os principais parâmetros intervenientes no processo da digestão anaeróbia, segundo Al Seadi et al. (2008) e Kossmann et al. (1999).

### 2.3.1. Temperatura

A digestão anaeróbia pode ocorrer em três faixas de temperatura: psicrófila (<math>20^{\circ}C</math>), mesófila (de  $20</math> a  $40^{\circ}C</math>) e termófila (acima de  $40^{\circ}C</math>, podendo chegar a  $65^{\circ}C</math>). Quanto maior a temperatura, maior a atividade microbiana e menor o tempo necessário para a digestão do substrato, que costuma variar entre 15 e 80 dias. Para a aplicação de digestores no tratamento de resíduos orgânicos, faz-se necessário o aquecimento dos digestores, de modo a ser assegurada uma condição mínima de temperatura (em geral mesófila ou termófila).$$$$

Embora a digestão em temperaturas termófilas promova uma maior geração de biogás, melhor higienização do composto e permita menores tempos de detenção, o processo pode ser inibido pela amônia (cuja toxicidade aumenta com a temperatura). A microbiota termófila é também mais sensível a alterações de temperatura do que a mesófila.

### **2.3.2. pH**

Os processos anaeróbios de degradação ocorrem em uma faixa de pH variando entre aproximadamente 5,5 e 8,5. As fases acidogênica e metanogênica possuem diferentes faixas de pH ótimo. Os microorganismos metanogênicos se desenvolvem preferencialmente em valores de pH entre 7 e 8, enquanto os acidogênicos se desenvolvem melhor em valores de pH levemente mais baixos. O controle do pH se faz importante, principalmente em digestores de estágio único, em que as fases acidogênica e metanogênica devem ocorrer em equilíbrio para evitar inibição de um ou outro grupo de microorganismos. Outro fator interveniente no processo consiste na temperatura de operação do digestor. Digestores mesofílicos operam bem com pH entre 6,5 e 8, enquanto digestores termofílicos operam em faixas um pouco mais altas.

### **2.3.3. Ácidos graxos voláteis**

Ácidos graxos voláteis são compostos intermediários no processo de digestão anaeróbia, formados durante a fase de acidogênese. Desequilíbrios no processo de digestão podem levar à acumulação deste composto, inibindo o processo como um todo. A acumulação de ácidos graxos voláteis tende a causar queda do pH dentro do digestor, mas pode ser de difícil detecção no caso de substratos com alta alcalinidade (ex.: dejetos de animais).

### **2.3.4. Amônia**

Na digestão anaeróbia, a maior parte da amônia consiste em um subproduto da quebra de proteínas. Embora seja um importante composto em fertilizantes, altas concentrações de amônia (acima de 80mg/l) podem inibir o processo de digestão, principalmente no caso de amônia livre, denominada amônia não ionizada ( $\text{NH}_3$ ). Alguns parâmetros que influenciam a concentração de amônia são a temperatura e o pH, sendo que o aumento de ambos aumenta a quantidade de amônia livre.

### 2.3.5. Disponibilidade de nutrientes

A digestão anaeróbia exige certo equilíbrio tanto de macro quanto de micronutrientes (elementos traço). A proporção ótima dos macronutrientes carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre consiste em 600:15:5:1. A presença de alguns elementos traço, como ferro, níquel, cobalto, selênio e tungstênio é igualmente importante para o crescimento de microorganismos anaeróbios.

### 2.3.6. Parâmetros operacionais

Nos itens abaixo estão descritos dois dos principais parâmetros operacionais de digestores anaeróbios, utilizados tanto para fins de dimensionamento quanto para ajustes de condições de operação.

#### a) Carga orgânica

A carga orgânica consiste em importante parâmetro técnico e econômico do digestor, representando a massa de matéria orgânica que pode alimentar o digestor por unidade de volume e de tempo. A Equação 1 ilustra o cálculo da carga orgânica:

$$C = m * \frac{f}{V} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

C é a carga orgânica (kg/d.m<sup>3</sup>)

m é a massa do substrato inserido por unidade de tempo (kg/d)

f é a fração orgânica do substrato (%)

V é o volume do digestor (m<sup>3</sup>)

#### b) Tempo de detenção hidráulica (TDH)

O TDH representa o tempo que o substrato fica retido no digestor. No caso de digestores em batelada, este valor é o próprio tempo de duração do processo no digestor. Em digestores contínuos, o TDH é obtido dividindo-se o volume do digestor pela vazão de entrada do substrato. O principal parâmetro determinante do TDH consiste na

taxa de degradação, que varia dependendo do substrato. O tempo de detenção hidráulica também deve levar em conta a taxa de crescimento bacteriano, uma vez que a taxa de retirada de bactérias do digestor não pode ser maior do que a taxa de reposição de microorganismos dentro do digestor. A temperatura de operação também influencia diretamente o TDH. Digestores termofílicos permitem TDH menores do que digestores mesofílicos. Em geral, o TDH varia entre 15 e 40 dias.

## 2.4. TECNOLOGIAS DE DIGESTORES DISPONÍVEIS

Segundo Vandevivere et al. (2003), os digestores de resíduos orgânicos podem ser classificados em três tipos: digestores de estágio único, de estágios múltiplos ou em batelada. Outra forma de classificação consiste no teor de sólidos do substrato: baixo teor de sólidos (teor de sólidos menor do que 15%) ou alto teor de sólidos (teor de sólidos entre 20 e 40%). Por fim, como já explicitado no item 2.3.1, os digestores existentes podem ser divididos, quanto à temperatura de operação, em mesofílicos ou termofílicos.

Nos digestores de estágio único, todas as etapas da digestão ocorrem em um mesmo reator (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese). São os tipos mais comuns de digestores, correspondendo a 90% dos digestores de resíduos europeus. A grande aceitação desta configuração de tratamento se deve a sua simplicidade de operação, bem como aos reduzidos custos de instalação e operação, quando comparados a sistemas de estágios múltiplos (VANDEVIVERE et al., 2003).

Entre os sistemas de estágios múltiplos, a configuração mais comum consiste na adoção de dois estágios, um para hidrólise e acidogênese (onde a condição limitante é a hidrólise da celulose) seguido de outro para acetogênese e metanogênese (onde a condição limitante é a lenta taxa de crescimento bacteriano). A vantagem deste sistema é a possibilidade de manter condições de operação ótimas diferentes para cada estágio, possibilitando uma maior taxa de degradação e de produção de biogás. As experiências práticas de digestão anaeróbia, no entanto, não têm verificado vantagens significativas da adoção desta configuração de digestores nas taxas de conversão do processo. Os digestores de estágio duplo representam apenas 10% dos digestores em operação na Europa, sendo adotados principalmente para a digestão de alguns tipos de substratos industriais,

que causam muita instabilidade de operação em digestores de estágio único (VANDEVIVERE et al., 2003).

Por fim, os digestores em batelada representam a configuração mais simples deste tipo de tratamento. Em seu funcionamento, o digestor é alimentado de uma única vez e o substrato passa por todas as etapas de degradação no mesmo digestor. Este método é utilizado geralmente em condições com alto teor de sólidos, entre 30 e 40% (VANDEVIVERE et al., 2003).

## 2.5. EXPERIÊNCIAS DE DIGESTORES ANAERÓBIOS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

Nas últimas décadas, diversos grupos de pesquisa têm se dedicado a otimizar o processo de digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Desta forma, os diferentes parâmetros relacionados com o processo têm sido investigados.

Kim et al. (2006) analisaram os efeitos da temperatura e do tempo de detenção hidráulica na digestão anaeróbia de resíduos de cozinha. Para uma melhor observação, foi adotado um processo de três estágios, separando hidrólise, acidogênese e metanogênese. A faixa de temperaturas analisadas foi de 30 a 55°C, com TDHs entre 8 e 12 dias. Verificou-se que as temperaturas termofílicas possibilitam maior produção de metano do que temperaturas mesofílicas. A maior taxa de produção de metano foi obtida com um TDH de 12 dias.

Charles et al. (2009) analisaram a implantação de uma etapa de pré-aeração do substrato, constituído de resíduos orgânicos urbanos, antes de ser levado a um digestor anaeróbio termofílico. Foi verificado que esta etapa de pré-aeração tinha condições de gerar calor suficiente para que o substrato atingisse 60°C, temperatura necessária para início do processo termofílico de digestão.

Autores têm destacado as vantagens da co-digestão de resíduos orgânicos com lodos de ETEs (ZUPANČIČ et al., 2008; SHARMA et al., 2000) e com dejetos de animais (HARTMANN; AHRING, 2005). A co-digestão possibilita a adição de um inóculo (microorganismos ativos) do processo anaeróbio aos resíduos orgânicos, permitindo igualmente um melhor equilíbrio nutricional com a adição de compostos ricos em nutrientes (KAYHANIAN; RICH, 1995).

Em termos comerciais, a Europa é a região mais desenvolvida na aplicação de digestores anaeróbios para tratamento de resíduos sólidos.

Esta liderança decorre das crescentes restrições ambientais à disposição de resíduos orgânicos em aterros, bem como dos estímulos para a produção de energias renováveis.

De Baere e Mattheeuws (2010) realizaram um inventário da instalação de digestores anaeróbios para tratamento de resíduos orgânicos municipais, considerando 3000t/ano como a capacidade mínima de processamento. Segundo os autores, a capacidade instalada na Europa ao final de 2010 está estimada em 6.000.000 t/ano, divididos em aproximadamente 200 plantas de biogás distribuídas em 17 países europeus. Constatam que tem sido observado incremento na adoção deste tipo de tecnologia desde o início da década de 90, apresentando nos últimos cinco anos uma média de 15 novas plantas instaladas por ano, com capacidade média de tratamento por planta de 30.000 t/ano. O país com maior capacidade absoluta instalada é a Alemanha (1.700.000 t/ano), enquanto os países com maior capacidade instalada per capita são Malta e Luxemburgo. Considerando as características das plantas instaladas nos últimos cinco anos, os autores ressaltam que as plantas termofílicas representam em torno de 40%; digestores de estágio único predominam em 95% delas; digestores com alto teor de sólidos equipam 60% das plantas de biogás.

A Dinamarca é um dos países que mais tem investido no aproveitamento energético do biogás gerado pelo tratamento de resíduos orgânicos. Desde a década de 1970, o país tem apoiando o desenvolvimento deste tipo de tecnologia de diversas formas, buscando diversificar a sua matriz energética, diminuir a sua dependência do petróleo e aumentar a oferta de energias renováveis. A crise do petróleo de 1973 e a conseqüente alta no preço da energia desencadearam este processo (SANNAA, 2004). Por estes motivos, o caso específico do desenvolvimento da digestão anaeróbia de resíduos na Dinamarca é exposto em mais detalhes no item subsequente, baseado no trabalho de revisão de Raeven e Gregersen (2007), que avaliou 41 publicações sobre o tema.

### 2.5.1. O CASO DA DINAMARCA

Os primeiros biodigestores do país foram construídos por fazendeiros, visando utilizar os dejetos oriundos da criação de bovinos e suínos para gerar aquecimento e energia elétrica localmente. Estas primeiras plantas foram iniciativas da própria comunidade, não fazendo

ainda parte de nenhum programa governamental. Em 1978, o Ministério do Comércio montou um grupo de profissionais (engenheiros e especialistas em agricultura) para apoiar o desenvolvimento tecnológico de plantas de biogás. O Ministério passou também a financiar a construção de algumas plantas de biogás para avaliar diferentes técnicas de processo. Parâmetros técnicos e econômicos das plantas existentes começaram a ser periodicamente monitorados. No ano de 1981, das 21 plantas registradas pelo programa, apenas nove funcionavam de forma razoavelmente estável e a geração de biogás encontrava-se muito abaixo do calculado durante as fases de projeto. As dificuldades desta primeira fase estavam relacionadas com a falta de experiência e de conhecimento técnico dos operadores pois, na maioria das vezes, as plantas eram operadas pelos próprios fazendeiros. Destacam também que, nesta época, faltavam profissionais qualificados para realizar os projetos e oferecer assessoria técnica adequada (RAEVEN; GREGERSEN, 2007).

A partir da década de 1980, visando diminuir os custos operacionais e aumentar a eficiência dos processos, os investimentos foram desviados dos biodigestores rurais para plantas de biogás centralizadas. Estas plantas recebiam dejetos dos fazendeiros (que não mais necessitavam operar os biodigestores), despejos orgânicos de indústrias e, em alguns casos, resíduos orgânicos domésticos. Os resíduos eram tratados em um período que variava de 10 a 25 dias. O biogás gerado era aproveitado em sistemas combinados de calor e geração de energia elétrica. Este modelo de planta foi adotado por diversas cidades na Dinamarca, contando agora com o apoio de algumas sociedades privadas e financiamentos do governo dinamarquês (RAVEN; GREGERSEN, 2007).

Em meados da década de 80, o preço do petróleo decaiu gradualmente e voltou a patamares competitivos. O governo dinamarquês, no entanto, havia decidido alterar sua matriz energética e torná-la descentralizada. Desta forma, aumentaram-se os impostos sobre os combustíveis derivados de petróleo e isentaram-se de impostos o gás natural e fontes renováveis de energia, entre elas, o biogás. Este fato assegurou a competitividade da energia provinda do biogás na Dinamarca, mesmo após a queda no preço do petróleo, o que não ocorreu em outros países europeus. Outro fator que contribuiu para a continuação da experiência do biogás no país foram as regras ambientais rígidas sobre a disposição de dejetos visando diminuir a contaminação do solo causada por nitrato. Estas regras geraram o aumento da procura por plantas centralizadas de biogás que tratassem os dejetos oriundos principalmente de atividades rurais. Aproveitando esta situação

favorável, ao fim da década de 1980, foi criado, pelas agências nacionais de energia, de meio ambiente e pelo Ministério da Agricultura, um programa nacional de biogás. Este programa esteve vigente entre os anos de 1988 e 2002, investindo na pesquisa, no desenvolvimento tecnológico, na construção e no monitoramento de plantas centralizadas de biogás. O apoio destes três órgãos governamentais reflete a multiplicidade de benefícios da alternativa para aquele período: aumentava a geração de energias renováveis, tratava resíduos orgânicos e melhorava as condições sanitárias da utilização de dejetos como fertilizante, proporcionando uma melhor proporção entre os nutrientes e removendo microorganismos patogênicos. Diversas cooperativas foram formadas por grupos de fazendeiros, que organizavam o transporte e armazenamento dos dejetos para processamento nas plantas de biogás. Estas cooperativas recebiam uma parte da renda gerada pela geração de energia, além de serem pagas por indústrias por gerenciarem também dejetos industriais. Desta forma, os fazendeiros não tinham custos para tratar seus dejetos. Durante este período, os investimentos feitos pelo programa permitiram que os lucros provenientes da exploração das plantas dobrassem de valor entre os anos de 1992 e 2000 (RAVEN; GREGERSEN, 2007).

Ao final da década de 1990, no entanto, ocorreu a liberalização do setor energético na Dinamarca. Os subsídios concedidos à produção de biogás foram reduzidos e o preço pago pela energia do biogás deixou de ser fixo, passando a flutuar de acordo com o mercado. A mudança política no governo nacional, que passou a ser liberal, definiu por priorizar os aspectos econômicos da geração de energia, cancelando fundos de pesquisa e culminando no fim do programa nacional de biogás iniciado em 1988. Com incertezas quanto às questões energéticas do país, a construção de novas plantas foi abortada a partir de 1998 (RAVEN; GREGERSEN, 2007).

### **2.5.2. Experiências no Brasil**

No Brasil, a experiência acumulada quanto ao tratamento de RSU em digestores anaeróbios ainda é limitada, consistindo, sobretudo, em trabalhos acadêmicos sobre o tema. Dentre os grupos de pesquisa brasileiros sobre o tema, destaca-se o grupo da Universidade Estadual da Paraíba, coordenado pelo Professor Valderi Duarte Leite, cujas pesquisas são discutidas a seguir.

Leite et al. (2002) avaliaram a eficiência de digestores anaeróbios em batelada no tratamento de resíduos orgânicos urbanos misturados com rúmen bovino. Foi avaliada a atuação de dois tipos de reatores (com volumes de 20 e de 50L), com percentuais de rúmen de 0%, 5%, 10% e 15%, durante um período de um ano. Verificou-se que a adição de inóculo (rúmen) influencia diretamente a estabilização da matéria orgânica, aumentando conseqüentemente a produção de biogás. O tempo de estabilização da matéria orgânica também foi menor nos reatores que receberam maior percentual de rúmen. Já à escala do reator não aparentou influenciar de maneira significativa a eficiência do processo.

Leite et al. (2003) testaram a aplicação de digestores anaeróbios em batelada para tratar resíduos provenientes de feiras livres e centrais de abastecimento de vegetais, inoculados com lodo de esgoto sanitário. Os restos de vegetais representavam 80% dos resíduos (em massa), enquanto os lodos eram responsáveis pelos outros 20%, resultando em um substrato com umidade igual a 80%. O período de retenção de sólidos utilizado foi de 270 dias.

Leite et al. (2009) compararam o desempenho da digestão anaeróbia de substratos com alto e com baixo teor de sólidos (20 e 5% de sólidos totais, respectivamente) em dois digestores com mesmas características. O reator utilizado para a digestão do substrato com alto teor de sólidos possuía um volume de 2200 litros e funcionava em regime de batelada, com recirculação do lixiviado semanalmente. O digestor que recebeu substrato com baixo teor de sólidos possuía o mesmo volume, mas era compartimentado em seis câmaras de mesmo tamanho. Parâmetros físico-químicos foram monitorados periodicamente, acompanhando a evolução da digestão dos substratos. Verificou-se que o substrato com baixo teor de sólidos foi digerido mais facilmente, necessitando de 90 dias para estabilizar 80% da massa de DQO aplicada e apresentando uma produção de biogás de  $0,25 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}_{\text{aplicada}}$ . Já o substrato com alto teor de sólidos necessitou de 270 dias para estabilização de 80% da biomassa, apresentando produção de biogás de apenas  $0,10 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}_{\text{aplicada}}$ .

Pinto (2006) avaliou a eficiência da digestão anaeróbia na estabilização de resíduos orgânicos de feira livre e de lodos de tanques sépticos. Foi avaliada a adição de dejetos suínos como inóculo e a recirculação do lixiviado do digestor. Verificou-se que a adição de dejetos suínos ocasionava degradação preferencial deste efluente em detrimento dos outros resíduos, não sendo notada uma melhora na degradação dos resíduos orgânicos. O teor de metano no biogás, no entanto, passou de 66% para 83% com a adição de 40% de dejetos

suínos no substrato. Foi observado que a atividade biológica e a decantação atuaram de forma equivalente na obtenção dos resultados de diminuição da carga orgânica do efluente.

Já no Rio Grande do Sul, Reichert e Silveira (2005) descrevem os resultados do Projeto Ecoparque. O Projeto consiste em um estudo sobre a viabilidade técnico-econômica e ambiental da implantação de digestores anaeróbios no tratamento dos resíduos orgânicos gerados no município de Porto Alegre, com aproveitamento energético do biogás. O estudo foi realizado por uma equipe composta por técnicos das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás), Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE) e Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre (DMLU). A metodologia seguida consistiu em uma revisão bibliográfica, contato com empresas que atuam na área e visitas técnicas a empreendimentos similares na Europa. Após esta etapa inicial de coleta de informações, foi realizada uma pré-concepção da planta de tratamento, incluindo o dimensionamento dos principais equipamentos. A pré-concepção possibilitou a realização da estimativa dos custos de implantação e operação, bem como uma estimativa das receitas oriundas do processo, consistindo na venda de energia elétrica, de composto estabilizado, de material reciclável e de créditos de carbono. O estudo apontou para a viabilidade do projeto, estimando um custo de tratamento variando entre 35,77 e 77,94 R\$/t, com o custo de disposição no aterro sanitário consistindo em 40 R\$/t.

## 2.6. ASPECTOS ECONÔMICOS

O tratamento de resíduos orgânicos por meio de digestores anaeróbios gera dois subprodutos valorizados economicamente: o composto estabilizado e o biogás. Conforme explicitado no item 2.5.1, com o exemplo da Dinamarca, a viabilidade da utilização da digestão anaeróbia para tratar resíduos orgânicos ainda depende fortemente dos incentivos governamentais que suportam esta opção. Desta forma, a viabilidade econômica da adoção de digestores anaeróbios varia significativamente entre países e regiões.

Amigun e von Blottnitz (2007) investigaram, por meio de análise estatística, a economia de escala referente a 21 instalações de biogás (variando em volume entre 4 e 100m<sup>3</sup>) em países africanos. Verificou-se que, para as condições dos países pesquisados, não se verificava economia de escala na implantação de plantas de biogás. A instalação de

digestores duas vezes maiores, por exemplo, acarretava em investimentos iniciais 130% maiores.

Gómez et al. (2010) estimaram o potencial de geração de energia elétrica na Espanha decorrente do aproveitamento energético de resíduos orgânicos urbanos, lodos de ETEs e dejetos de criações de animais. As estimativas foram feitas tomando por base informações georreferenciadas desagregadas de estatísticas de população (humana e de animais) em nível municipal. Adotando-se a digestão anaeróbia como método de tratamento dos resíduos considerados, estimou-se em 8,13TWh/ano o potencial de geração de energia elétrica, o que representa em torno de 3% da geração líquida de energia no país. O preço estimado da energia elétrica gerada seria de 0,090€/kWh, superior ao preço médio de energia elétrica na Espanha (0,083€/kWh).

Segundo AND International (2004), o mercado de biogás na França é movido, sobretudo, pela necessidade de tratamento de rejeitos orgânicos fermentáveis, não sendo a produção de biogás, por si só, o fator determinante na tomada de decisão quanto ao investimento neste tipo de tecnologia.

Morin et al.(2010) analisaram a viabilidade econômica da adoção de digestores anaeróbios para tratar os resíduos orgânicos (resíduos urbanos e lodo de ETEs) gerados em um município de 150.000 habitantes na província de Quebec, Canadá. Foram consideradas duas alternativas de aproveitamento do biogás: queima para cogeração de energia elétrica e tratamento para substituição do gás natural. Foram considerados os custos de implantação, operação e venda do biogás (ou de energia elétrica, no caso de cogeração). Verificou-se um período de retorno do investimento de 3,7 anos para a opção de cogeração, enquanto a opção de tratamento do biogás para substituição do gás natural não se mostrou rentável. Em compensação, a geração de biogás seria suficiente para abastecer 75% da frota de ônibus do município. Uma análise de sensibilidade apontou o preço do gás natural como parâmetro que mais influencia a viabilidade econômica desta alternativa, seguido dos custos operacionais e da taxa cobrada pelo manejo de resíduos. Os autores destacam que o cenário que considera o tratamento do biogás para substituição do gás natural tende a se tornar economicamente viável nos próximos anos, considerando os estímulos criados pelo mercado de carbono e a tendência de aumento no preço do gás natural.

Coelho (2001) realizou uma análise sobre a geração de energia elétrica utilizando biogás proveniente da decomposição de resíduos no Brasil. O autor estima um potencial de geração de energia a partir de

resíduos orgânicos urbanos entre 300 e 500MW. Este estudo destaca que a geração de energia a partir do biogás pode representar importante aumento na qualidade e na viabilidade econômica do saneamento nacional, uma vez que subsidia parte dos custos de instalações de saneamento (especialmente aterros sanitários e ETEs) e exige melhores condições de operação destas instalações, para garantir a geração adequada de biogás. Pelos benefícios sócio-econômicos e ambientais decorrentes do aproveitamento energético do biogás, este autor pondera que são necessários incentivos governamentais que estimulem e tornem viável a formação deste tipo de mercado no Brasil, uma vez que a eletricidade provinda da queima do biogás ainda não é competitiva, se comparada com fontes tradicionais de energia, tais como hidrelétricas, gás natural e outros tipos.

Conforme pode ser verificado por estas experiências relatadas na literatura, sob aspectos puramente econômicos, a utilização de digestores anaeróbios no tratamento de resíduos orgânicos não costuma ser uma opção atrativa, comparada a outras alternativas de disposição, tais como aterro sanitário, compostagem e incineração. Realizando uma análise de viabilidade sob condições mais abrangentes incluindo, por exemplo, variáveis energéticas, sociais e ambientais, a utilização de digestores anaeróbios passa a apresentar grandes vantagens.

Para o Projeto Ecoparque (descrito no item 2.5.2), por exemplo, Reichert et al. (2004) realizaram uma análise multicritério para comparar quatro alternativas de disposição dos resíduos orgânicos do município de Porto Alegre: aterro sanitário, incinerador, reator de plasma e digestores anaeróbios. Para tanto, foi construída uma matriz de decisão, atribuindo pontuações de importância para os diversos critérios considerados. A matriz final preenchida está exposta na Tabela 2.1. Verifica-se que a opção de digestão anaeróbia é apontada como solução mais favorável com grande diferença de pontuação em relação às outras alternativas. Nesta análise, as vantagens que mais destacaram a opção dos digestores anaeróbios sobre as demais alternativas são a possibilidade de recuperação de massa, geração de empregos, baixa geração de passivo ambiental e baixo risco operacional. Pode-se observar que suas maiores vantagens não estão nas variáveis econômicas (custos de instalação e operação), mas conjugadas com outras variáveis, acabam por tornar a opção de digestão anaeróbia a mais indicada para o caso exposto.

Tabela 2. 1- Matriz de decisão do Projeto Ecoparque, adaptado de Reichert et al. (2004)

Tipo de Tecnologia		Digestão Anaeróbia		Incineração		Reator de Plasma		Aterro Sanitário	
critério	peso	escore parcial	escore ponderado	escore parcial	escore ponderado	escore parcial	escore ponderado	escore parcial	escore ponderado
Reativação NUTEPA	1	5	5	5	5	5	5	1	1
Exigência de área qualificada	5	-2	-10	-2	-10	-2	-10	-5	-25
Geração de passivo ambiental	2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-5	-10
Esgotabilidade	4	-1	-4	-1	-4	-1	-4	-5	-20
Emissão de odores	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-5	-5
Risco ambiental	5	-1	-5	-1	-5	-1	-5	-3	-15
Risco operacional	3	-3	-9	-1	-3	-3	-9	-1	-3
Geração de resíduos sólidos	2	-5	-10	-2	-4	-2	-4	-5	-10
Geração de resíduos líquidos	3	-5	-15	-1	-3	-1	-3	-5	-15
Geração de resíduos gasosos	4	-1	-4	-5	-20	-5	-20	-1	-4
Recuperação de massa	3	5	15	1	3	1	3	1	3
Recuperação energética	5	3	15	5	25	5	25	2	10
Custo de instalação	4	-4	-16	-5	-20	-5	-20	-2	-8
Custo de operação	5	-4	-20	-4	-20	-5	-25	-1	-5

**Tabela 2. 2- Matriz de decisão do Projeto Ecoparque, adaptado de Reichert et al. (2004) (continuação)**

Tipo de Tecnologia		Digestão Anaeróbia		Incineração		Reator de Plasma		Aterro Sanitário	
critério	peso	escore parcial	escore ponderado	escore parcial	escore ponderado	escore parcial	escore ponderado	escore parcial	escore ponderado
<b>Geração de empregos</b>	2	5	10	1	2	1	2	1	2
<b>Facilidade de licenciamento</b>	5	4	20	1	5	1	5	5	25
<b>Background técnico</b>	4	5	20	5	20	2	8	5	20
<b>Aceitabilidade</b>	2	3	6	1	2	2	4	3	6
<b>TOTAIS</b>		-5		-30		-51		-53	

Escala de argumentos de ponderação (Pesos): 1 a 5

Escala de atributos (Escore Parciais): -5 a -1, onde mais negativo, maior a demanda; 1 a 5, quanto maior o benefício, maior o número

A entrada em vigor do Protocolo de Quioto, no ano de 2005, abriu a possibilidade de venda de Redução de Emissões Certificadas de gases do efeito estufa (GEE) de projetos brasileiros para países com metas de redução (CGEE, 2008). O desenvolvimento do Mercado de Carbono, decorrente deste fato, tem viabilizado a implantação de diversos projetos de redução de emissões, especialmente em países como China, Índia e Brasil. A queima de metano é uma das formas previstas de redução de emissões de GEE. No caso de digestores anaeróbios para tratamento de resíduos, há uma dupla possibilidade de ganho:

- a) recuperação e queima de praticamente 100% do gás metano gerado durante a decomposição anaeróbia, ressaltando que o gás metano contribui para o aquecimento global de forma 20 vezes mais intensa do que o gás carbônico, que de outra forma estaria sendo gerado em aterros sanitários com grande parte emitida para a atmosfera;
- b) substituição de combustível fóssil por combustível renovável, o biogás, já que o aproveitamento energético do biogás evitaria emissões de GEE. A utilização de biogás como combustível para ônibus, por exemplo, evitaria a queima de óleo diesel para o mesmo fim.

## 2.7. ASPECTOS AMBIENTAIS

Nas últimas duas décadas, diversos estudos foram realizados visando levantar os aspectos ambientais de plantas de biogás. Mais recentemente, estudos de análise de ciclo de vida deste tipo de instalação têm contribuído para a quantificação destes aspectos.

Um dos grupos mais atuantes neste tipo de estudo são pesquisadores da Universidade de Lund, na Suécia. Börjesson e Berglund (2006) realizaram uma análise de ciclo de vida das emissões atmosféricas de plantas de biogás alimentadas com seis tipos diferentes de substratos. As emissões consideradas foram: CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, hidrocarbonetos, CH<sub>4</sub> e material particulado. Os autores destacam a importância de definir, para este tipo de análise, o sistema de produção de biogás considerado, uma vez que os impactos ambientais dependem significativamente da eficiência energética dos equipamentos, do

substrato utilizado, de vazamentos do sistema e da tecnologia empregada. Em uma segunda etapa deste mesmo estudo (BÖRJESSON; BERGLUND, 2007), uma análise ambiental foi realizada comparando plantas de biogás com outros sistemas de manejo de resíduos e de geração de energia. Segundo os autores, a substituição de sistemas convencionais de geração de energia e manejo de resíduos por sistemas de biogás tende a amenizar diretamente diversos problemas ambientais atuais, tais como mudanças climáticas, eutrofização, acidificação e poluição atmosférica. Os benefícios indiretos podem ser ainda mais significativos. Um exemplo é a utilização de digestão anaeróbia ao invés de compostagem aeróbia de resíduos orgânicos, uma vez que a primeira pode reduzir a lixiviação de nitrogênio no solo, emissão de amônia e de metano.

Berglund e Börjesson (2006) estudaram o balanço energético da produção de biogás em digestores anaeróbios e sua relação com o substrato utilizado, design do sistema e escala do reator, considerando reatores centralizados de grande escala ou reatores rurais de pequena escala. A unidade de energia utilizada nas comparações do balanço energético foi a “energia primária”, definida como energia de recursos naturais não transformados ou processados. Verificou-se que a maior demanda de energia corresponde à energia para a operação da planta de biogás, variando entre 50 e 80% da energia demandada pelo sistema. Em geral, a energia demandada pelo sistema de biogás representa entre 20 e 40% da energia total contida no biogás, configurando, desta forma, um balanço energético positivo (a energia produzida é maior do que a energia consumida pelo sistema). Verificou-se também que a distância máxima de transporte das matérias primas utilizadas para a produção de biogás, antes do balanço energético se tornar negativo, varia entre 200 e 700 km, dependendo da matéria prima considerada, uma vez que quanto maior o índice de gorduras na matéria prima, como resíduos de matadouros, maior a distância de transporte aceitável.

As distâncias calculadas indicam que a coleta e o transporte de resíduos de zonas urbanas até estações de tratamento próximas podem apresentar condições favoráveis para a adoção da digestão anaeróbia como método de tratamento, do ponto de vista do balanço energético.

No estudo de Berglund e Börjesson (2006), são dois os principais tipos de matéria prima consideradas para a produção de biogás: vegetais cultivados com este propósito ou resíduos orgânicos de diversos processos industriais, agrícolas ou domésticos. A energia necessária para produzir os vegetais cultivados para a geração de biogás é considerada no balanço energético, enquanto a energia necessária para a produção

dos resíduos não é levada em conta. O manejo de cultivos para biogás corresponde a 45% da demanda de energia dos sistemas que utilizam esta matéria prima.

Os resultados encontrados indicam que o cultivo de vegetais destinados a produção de biogás apresenta um balanço energético menos favorável do que a utilização de resíduos como matéria prima de digestão anaeróbia. Por outro lado, a utilização de resíduos, tais como aqueles provenientes de ETEs, matadouros, criações de animais e alimentares, para a produção de biogás apresenta uma demanda energética geralmente inferior a 30% da energia contida no biogás, demonstrando a sustentabilidade energética deste processo (BERGLUND; BÖRJESSON, 2006). A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos se configura, portanto, como uma opção promissora de tratamento, uma vez que praticamente a metade dos resíduos urbanos produzidos no Brasil são orgânicos.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. ESTADO DA ARTE DA UTILIZAÇÃO DE DIGESTORES ANAERÓBIOS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

Com o objetivo de levantar informações sobre a situação atual da utilização de digestores anaeróbios no tratamento de resíduos orgânicos, foi realizada uma pesquisa bibliográfica nas bases de dados *Scielo* e *Science Direct*. Foram procurados estudos relacionados com o tratamento de resíduos sólidos por meio da utilização de digestores (ou reatores) anaeróbios, sendo igualmente pesquisados estudos sobre a produção e o tratamento do biogás.

Além das bases de dados, outros sites de internet foram consultados, principalmente sites de universidades e de empresas fornecedoras de serviços e equipamentos relacionados ao tema.

#### 3.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE FLORIANÓPOLIS

A situação da produção de resíduos orgânicos no município de Florianópolis foi obtida por meio do relatório final de caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis, referentes ao ano de 2002 (COMCAP, 2002). A partir deste relatório, obtiveram-se valores da produção anual per capita de resíduos sólidos e a fração orgânica dos resíduos urbanos do município. Estes dados foram utilizados no dimensionamento dos digestores do projeto, que neste estudo será denominado Projeto Florianópolis (item 3.3).

Adotando-se um horizonte de projeto de 10 anos, estimou-se a quantidade anual de resíduos para o período com base em dois parâmetros: geração per capita diária de resíduos (COMCAP, 2002) e projeção populacional para a cidade de Florianópolis para o período (CAMPANÁRIO, 2007). A multiplicação da geração per capita de resíduos por 365 dias/ano e pela população do ano correspondente resultou na quantidade relativa à massa de resíduos gerada a cada ano.

O dimensionamento do digestor foi feito com base no valor da geração anual de resíduos sólidos no município de Florianópolis. Deste valor, calculou-se a fração orgânica, obtendo-se um valor da geração

anual de resíduos orgânicos de Florianópolis (GRO). Este valor corresponde à quantidade de substrato que alimentará o digestor.

Segundo Deublein e Steinhauser (2008), os resíduos orgânicos domésticos costumam possuir um teor de sólidos em torno de 20%. Este parâmetro corresponde aos sólidos totais presentes no substrato. Seu valor anual é calculado segundo a Equação 1.

$$ST = GRO * 0,20 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

ST – sólidos totais (t/ano)

GRO- geração anual de resíduos sólidos (t/ano)

Dos sólidos presentes no substrato, apenas a fração orgânica (correspondente ao parâmetro Sólidos Voláteis) estará sujeita ao processo de degradação anaeróbia no digestor. Esta fração corresponde tipicamente a 85% (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008), conforme ilustrado pela Equação 2.

$$SV = ST * 0,85 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

SV – sólidos voláteis (t/ano)

ST – sólidos totais (t/ano)

A eficiência de sistemas anaeróbios costuma ser calculada com base em dados de DQO. Para resíduos orgânicos, a DQO pode ser estimada segundo a relação  $DQO/SV=1,15$  kg/kg (valor utilizado por engenheiros projetistas de digestores). A geração anual de DQO foi então calculada segundo a Equação 3.

$$DQO = SV * 1,15 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

DQO – demanda química de oxigênio (t/ano)

SV – sólidos voláteis (t/ano)

### 3.3. DIMENSIONAMENTO DOS DIGESTORES

O cálculo do volume necessário para o digestor depende do volume de substrato a ser inserido. Pelo fato dos resíduos orgânicos apresentarem um teor de sólidos em torno de 20%, faz-se necessária uma diluição inicial, para que o substrato adquira um teor de sólidos em torno de 17% (teor de sólidos requerido pela tecnologia escolhida). Esta diluição pode ser feita com recirculação de efluente do próprio sistema. A quantidade de líquido a ser adicionada ao substrato (assumindo o teor de sólidos como próximo de zero), pode ser calculada segundo a Equação 4.

$$L_{\text{diluição}} = \frac{ST}{0,17} - \text{GRO} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$L_{\text{diluição}}$  – quantidade de líquido de diluição (t/ano)

ST – sólidos totais (t/ano)

GRO- volume anual de resíduos sólidos gerados ( $\text{m}^3/\text{ano}$ )

A quantidade total de substrato alimentada anualmente ao digestor corresponde, portanto, a soma dos resíduos orgânicos gerados com o líquido de diluição ( $\text{GRO} + L_{\text{diluição}}$ ). Assumindo-se que o peso específico do substrato é igual ao peso específico da água ( $1 \text{ t/m}^3$ ), o valor da massa de substrato calculada (em t/ano) corresponde ao volume de substrato ( $\text{m}^3/\text{ano}$ ), denominado  $V_s$ . O volume do digestor é então calculado segundo a Equação 5.

$$V_{\text{digestor}} = V_s * \text{TDH} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

$V_{\text{digestor}}$  – volume do digestor ( $\text{m}^3$ )

$V_s$  – volume diário de substrato ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )

TDH – tempo de detenção hidráulica (dias)

### 3.4. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Uma vez conhecida a quantidade de DQO do substrato, pode-se estimar a geração anual de biogás. Para tanto, considera-se uma eficiência de conversão de DQO em metano de 85% e a relação  $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{kgDQO}=0,35$  (Equação 6).

$$V_{\text{metano}} = \text{DQO} * 0,35 * 0,85 \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

$V_{\text{metano}}$  – Volume anual de metano gerado ( $\text{Nm}^3/\text{ano}$ )

DQO – demanda química de oxigênio ( $\text{kg}/\text{ano}$ )

Cada  $\text{m}^3$  de metano corresponde a 9,94 kWh de energia. Considerando-se o volume horário de metano gerado pelo sistema, pode-se calcular o potencial energético do biogás gerado, conforme Equação 7.

$$\text{PE} = V_{\text{metano}} * 9,94 \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

PE – Potencial energético (kW)

$V_{\text{metano}}$  – Volume horário de metano gerado ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )

Do potencial energético calculado, apenas uma parte pode efetivamente ser aproveitada como energia térmica ou elétrica. Este valor depende da tecnologia de conversão adotada. Para a tecnologia de turbinas a gás, por exemplo, a eficiência de conversão pode chegar a 40%, ou seja, 40% da energia primária é convertida em eletricidade. No caso de adoção de tecnologias de co-geração (aproveitamento elétrico e térmico), até 50% da energia pode ser aproveitada na forma de calor (geração de vapor). Para esta configuração, considerando turbinas à gás, até 90% da energia pode ser aproveitada, sendo 50% na forma térmica e 40% na forma elétrica, enquanto 10% seriam perdidos pelos processos do sistema.

Segundo Deublein e Steinhäuser (2008), a energia consumida por uma planta de biogás, nas etapas de aquecimento do substrato, agitadores, bombeamento, entre outras, corresponde entre 20 e 30% da energia produzida pela planta por meio da queima do biogás. Este valor está de acordo com o valor adotado por Reichert et al. (2004) para as

estimativas de custos de operação do projeto Ecoparque, onde considerou-se que a planta consumiria em torno de 20% da energia elétrica gerada.

### 3.5. ESTIMATIVA DE CUSTOS E RECEITAS DO PROJETO FLORIANÓPOLIS

Este item detalha a estimativa dos custos de instalação e dos custos e receitas de operação do Projeto Florianópolis.

#### **3.5.1. Estimativa de custos de instalação do projeto Florianópolis**

Os custos de instalação do Projeto Florianópolis foram estimados de forma simplificada, com base no método apresentado por Deublein e Steinhäuser (2008). Os autores apresentam valores de referência para a estimativa de custos de plantas de biogás, referentes aos investimentos no digestor (obras civis e equipamentos eletro-mecânicos) e no conjunto motor-gerador, para o aproveitamento energético do biogás. Estes valores correspondem à realidade alemã deste tipo de tecnologia. Para levar em consideração os custos de importação e adaptações necessárias à realidade brasileira, adicionou-se ao valor total calculado um fator de segurança de 30%.

#### **3.5.2. Estimativa de custos de operação do projeto Florianópolis**

Os custos de operação do Projeto Florianópolis foram estimados com base nos custos de operação do Projeto Ecoparque (REICHERT et al., 2004). Esses autores apresentam os custos de operação do Projeto Ecoparque, dimensionado para receber todos os resíduos urbanos do município de Porto Alegre, realizar sua triagem e tratar a fração orgânica por meio de digestores anaeróbios, com aproveitamento energético do biogás para a geração de energia elétrica. Pelas dificuldades em estimar os custos de operação deste tipo de projeto, que possivelmente não possui nenhuma aplicação em escala comercial no Brasil, e visando estabelecer a ordem de grandeza de tais custos,

considerou-se que os custos de operação seriam diretamente proporcionais a capacidade de tratamento do projeto. Desta forma, sendo o Projeto Florianópolis dimensionado para uma capacidade de tratamento correspondente a 44,3% da capacidade do Projeto Ecoparque, seus custos de operação representariam 44,3% dos custos do Projeto Ecoparque.

Destaca-se que o custo estimado a partir dos valores apresentados por Reichert et al. (2004) corresponde à adoção de todos os equipamentos e processos previstos para o tratamento de RSU do Projeto Ecoparque, tais como, processos triagem e separação (separação manual, peneira rotativa, separador eletromagnético), pré-tratamento (trituração, separador balístico) e pós-tratamento (prensa, centrífuga, compostagem, maturação).

### **3.5.3. Estimativa de receitas de operação do projeto Florianópolis**

Para estimar as receitas de operação do Projeto Florianópolis foram levantados na literatura possíveis destinações para os subprodutos gerados na digestão anaeróbia, considerando o composto, o efluente e o biogás. Concluiu-se que as opções de destinação mais factíveis para o município de Florianópolis seriam:

- a) Composto: estabilização da fração sólida resultante do processo por meio de compostagem e comercialização deste composto como fertilizante agrícola. O preço adotado corresponde ao preço praticado pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU), que comercializa composto proveniente da estabilização de resíduos orgânicos da região de Porto Alegre, RS.
- b) Efluente: tratamento do efluente em ETE e posterior lançamento em corpo receptor. Destaca-se que seria possível direcionar o efluente para usos agrícolas, aproveitando seus nutrientes, embora esta opção não tenha sido considerada no Projeto Florianópolis por demandar um maior controle da qualidade do efluente, bem como de uma maior organização logística para o transporte deste efluente para as zonas rurais.

- c) Biogás: geração de energia elétrica por meio de um conjunto motor-gerador, permitindo uma conversão de 40% da energia presente no biogás em energia elétrica. A energia gerada seria comercializada pelo Programa PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, Governo Federal), como energia gerada a partir de biomassa, sendo adotados os valores pagos por energia gerada apresentados por Reichert et al. (2004).

### 3.6. COMPARAÇÃO DE CUSTOS ENTRE DIGESTORES ANAERÓBIOS E ATERROS SANITÁRIOS

Visando comparar os custos associados à adoção de digestores com a alternativa de disposição de resíduos praticada atualmente em Florianópolis, quais sejam, os aterros sanitários, realizou-se um balanço entre os custos e as receitas de operação do Projeto Florianópolis. A diferença entre os custos e as receitas anuais do projeto corresponde ao déficit para que o processo de tratamento tenha sustentabilidade financeira. Dividindo-se este déficit pela capacidade de tratamento anual do Projeto, obtém-se o valor mínimo a ser cobrado como taxa de tratamento de resíduos orgânicos em Florianópolis. O valor desta taxa pode ser diretamente comparado ao valor atualmente pago pelo município de Florianópolis para dispor seus resíduos no aterro de Biguaçu, obtido junto à Secretaria de Habitação e Saneamento Ambiental do município de Florianópolis.



## 4. RESULTADOS

Este capítulo descreve os resultados do dimensionamento do sistema de digestão anaeróbia do Projeto Florianópolis, bem como uma estimativa dos custos de instalação e operação e uma comparação entre o sistema proposto e o atual método de disposição final do município de Florianópolis. O estado da arte sobre o tema de digestão anaeróbia de resíduos, referente ao primeiro objetivo específico, está apresentado no Capítulo 2.

### 4.1. ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS PARA O PERÍODO 2011 – 2021 EM FLORIANÓPOLIS

Para a estimativa da geração anual de resíduos sólidos orgânicos, assumiu-se que tanto a geração per capita de RSU quanto o valor de sua fração orgânica se manteriam constantes durante o período de projeto, estabelecido em 10 anos. O aumento no volume de resíduos, portanto, ocorre somente pelo aumento populacional no período. A Tabela 4.1 ilustra os dados de entrada e resultado da estimativa de geração anual de resíduos sólidos orgânicos. Como pode ser observado, estima-se uma geração anual de resíduos orgânicos de aproximadamente 86.000 t/ano no ano de 2021.

**Tabela 4. 1- Estimativa de geração anual de resíduos sólidos orgânicos (2011 a 2021)**

Ano	Geração per capita de RSU	Fração orgânica dos RSU	Projeção populacional	Geração de resíduos orgânicos	Geração de resíduos orgânicos
-	kg/d	%	habitantes	t/dia	t/ano
2011	0,77	46,35	538519	192	70151
2012	0,77	46,35	551319	197	71819
2013	0,77	46,35	564120	201	73486
2014	0,77	46,35	576920	206	75153
2015	0,77	46,35	<b>589720</b>	210	76821
2016	0,77	46,35	601768	215	78390
2017	0,77	46,35	613815	219	79960
2018	0,77	46,35	625863	223	81529
2019	0,77	46,35	637910	228	83098
2020	0,77	46,35	<b>649958</b>	232	84668
2021	0,77	46,35	661012	236	<b>86108</b>

## 4.2. DIMENSIONAMENTO DOS DIGESTORES PARA FLORIANÓPOLIS

Os parâmetros adotados para o dimensionamento do digestor e para o cálculo do potencial energético estão apresentados na Tabela 4.2. Os parâmetros adotados se baseiam tanto em valores retirados da literatura técnica, quanto em valores empíricos praticados por engenheiros projetistas de plantas de biogás.

**Tabela 4. 2- Parâmetros adotados no dimensionamento do digestor**

<b>Parâmetros adotados</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>	<b>Observações</b>
Geração de Resíduos Orgânicos (GRO)	t/ano	86.000	COMCAP (2002)
Sólidos Totais (ST)	%	20	Deublein e Steinhauser (2008)
Fração orgânica (SV/ST)	%	85	Deublein e Steinhauser (2008)
DQO/SV	kg/kg	1,15	
Geração de metano por DQO degradada	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO	0,35	
Eficiência de conversão de DQO (Ef)	%	85	
Teor de CH <sub>4</sub> no biogás	%	55	Deublein e Steinhauser (2008)
Potencial energético do CH <sub>4</sub>	kWh/Nm <sup>3</sup> C H <sub>4</sub>	9,94	
Eficiência de conversão de metano em energia elétrica	%	40	considerando turbinas a gás
Sólidos totais do substrato no reator	%	17	
Tempo de detenção hidráulica (TDH)	dias	28	Deublein e Steinhauser (2008)

Os parâmetros calculados estão apresentados na Tabela 4.3. Os cálculos seguiram as equações descritas na metodologia. Com um volume de digestor necessário de 7.748 m<sup>3</sup>, verifica-se que é possível tratar todo o volume orgânico gerado em apenas um reator, construído em aço inoxidável ou em concreto, de formato cilíndrico, com dimensões aproximadas de 12m (altura) x 29m (diâmetro).

### 4.3. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM FLORIANÓPOLIS

O volume de metano gerado e o potencial energético foram calculados segundo descrito no item 3.4, sendo os resultados resumidos na Tabela 4.3. Segundo Deublein e Steinhauser (2008), os atuais métodos de recuperação de energia do biogás (como turbinas a gás) permitem aproveitar até 90% da energia contida neste combustível, sendo possível converter 40% em energia elétrica e 50% em energia térmica. Pelo fato do clima em Florianópolis não demandar sistemas de aquecimento em edificações, a energia térmica poderia ser aproveitada em processos industriais, embora esta opção não tenha sido considerada no Projeto Florianópolis devido às dificuldades de estimar os custos e receitas inerentes a esta opção.

**Tabela 4. 3- Parâmetros calculados do projeto Florianópolis**

<b>Parâmetros calculados</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
ST	t/ano	17.200
SV	t/ano	14.620
DQO	t/ano	16.813
L <sub>diluição</sub>	t/ano	15.000
V <sub>digestor</sub>	m <sup>3</sup>	7.748
V <sub>metano</sub>	Nm <sup>3</sup> /ano	5.001.868
Potencial energético	kW	5.676
Potencial elétrico (40%)	kW	2.270
Potencial térmico (50%)	kW	2.838

Já o potencial de energia elétrica seria o suficiente para abastecer em torno de 5.100 residências em Florianópolis, considerando o consumo médio de 325,7 kWh/mês, segundo Fedrigo et al. (2008). Há de se descontar, no entanto, o consumo de energia elétrica da própria planta, em torno de 20% da energia gerada. Neste caso, a potência elétrica disponível para comercialização seria de 1.816 kW, o suficiente para abastecer aproximadamente 4.070 residências.

#### 4.4. ESTIMATIVA DE CUSTOS DA ADOÇÃO DE DIGESTORES ANAERÓBIOS EM FLORIANÓPOLIS

Com o objetivo de comparar os custos entre a disposição final de resíduos em aterro e a utilização de digestores no município de Florianópolis, uma análise dos custos simplificada foi realizada, tomando como base os estudos de Reichert et al. (2004) e de Deublein e Steinhauser (2008). Os custos de instalação e de operação foram avaliados.

##### 4.4.1. Custo de instalação

De acordo com as estimativas de custo do Projeto Ecoparque (dimensionado para tratar 170.600 t/d), os custos de obras civis e de equipamentos correspondem a aproximadamente 80% dos custos totais de implantação de biodigestores para tratamento de resíduos orgânicos (REICHERT et al., 2004). Os 20% restantes correspondem principalmente aos custos de engenharia e licenças. Por este motivo, a estimativa dos custos de instalação pode apresentar grande variação entre diferentes projetos, de acordo com os custos de mão-de-obra e de materiais praticados em cada local.

A título de ilustração, a Tabela 4.4 apresenta o detalhamento dos custos de instalação do Projeto Ecoparque. Ressalta-se que os custos de equipamentos importados foram estimados com base no valor do dólar no ano de 2004, equivalente a R\$ 3,00. No início do ano de 2011, o dólar estava valendo quase a metade do valor considerado, sendo cotado ao valor de R\$ 1,68.

Os custos de instalação referentes à adoção do processo de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos foram estimados utilizando-se os dados apresentados por Deublein e Steinhauser (2008). Os autores apresentam valores de referência para a estimativa de custos de plantas de biogás. A Tabela 4.5 apresenta os valores de referência para os investimentos no digestor (obras civis e equipamentos eletro-mecânicos) e no conjunto motor-gerador, para o aproveitamento energético do biogás.

**Tabela 4. 4 – Custos de instalação do Projeto Ecoparque**

<b>Item</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo unitário (R\$)</b>	<b>Custo total (R\$)</b>
Área (ha)	20	80.000	1.600.000
Eia/Rima	1	600.000	600.000
Projeto básico	1	800.000	800.000
Projeto executivo	1	1.500.000	1.500.000
Licenciamento	1	20.000	20.000
Obras civis (galpão industrial) m2	33500	1.377	46.129.500
Obra civis (digestor e gasômetro) m2	6800	3.240	22.032.000
Equipamentos (esteiras, est. metálica, tubulações,...)	1	10.000.000	10.000.000
Equipamentos/veículos	1	2.000.000	2.000.000
Equipamentos (bombas, prensas, centrífugas,...)	1	50.000.000	50.000.000
Tecnologia/engenharia	1	32.000.000	32.000.000
<b>Subtotal</b>			<b>166.681.500</b>
<b>Total (acrescido do fator de segurança de 10%)</b>			<b>183.349.650</b>

Fonte: adaptado de Reichert et al. (2004)

**Tabela 4. 5 – Valores de referência para estimativa de custos segundo Deublein e Steinhauser (2008)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Investimento no digestor (40% equipamentos)	US\$/m <sup>3</sup>	300 - 500
Investimento no conjunto motor-gerador	US\$/kWel	650 - 1300

Para estimar os custos do Projeto Florianópolis, adotaram-se os valores mais conservadores apresentados na Tabela 4.5 (500 US\$/m<sup>3</sup> e 1300 US\$/kWel). Ao valor total de investimento estimado para o projeto, adicionou-se um fator de segurança de 30%, referente a incertezas e aos possíveis custos de importação de equipamentos. A Tabela 4.6 apresenta os resultados completos. A estimativa dos custos de instalação de uma planta de biogás no município de Florianópolis apontou para investimentos da ordem de aproximadamente 15 milhões de reais, referentes aos investimentos em obras civis e equipamentos

eletromecânicos para o digestor e para a unidade de geração de energia elétrica.

**Tabela 4. 6 – Custos de instalação do projeto Florianópolis**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Investimento em obras civis	R\$	3.904.964,38
Investimento em equipamentos	R\$	2.603.309,59
Investimento no conjunto motor-gerador	R\$	4.958.234,77
Sub-total	R\$	11.466.508,74
Total (acrescido de 30%)	R\$	14.906.461,37

cotação em 11/01/2011: US\$ 1,00 = R\$ 1,68

#### **4.4.2. Custos de operação**

Pela dificuldade de estimar os custos de operação de um projeto de digestão anaeróbia de resíduos sólidos em Florianópolis, optou-se por tomar como base os valores levantados por Reichert et al. (2004), que o fizeram de forma conservadora. A Tabela 4.7 apresenta o detalhamento dos custos de operação do Projeto Ecoparque. Estes custos, no entanto, englobam diversos outros processos que não fazem parte do proposto no Projeto Florianópolis, uma vez que o Projeto Ecoparque foi dimensionado para receber todos os resíduos urbanos do município de Porto Alegre, incluindo equipamentos e mão-de-obra para realizar a separação e triagem dos diferentes tipos de resíduos no local.

A partir do custo total apresentado na Tabela 4.7, admitiu-se que os custos de operação de um projeto análogo ao Ecoparque no município de Florianópolis seria diretamente proporcional à capacidade de tratamento dos projetos. Desta forma, sendo o Projeto Ecoparque dimensionado para uma capacidade de tratamento de 420.000 tRSU/a e a geração de resíduos em Florianópolis equivalente a 186.000 tRSU/a, os custos de operação desta alternativa em Florianópolis representaria 44,3% do custo de instalação do Projeto Ecoparque.

**Tabela 4. 7 – Custos de operação do projeto Ecoparque**

<b>Item</b>	<b>Custo total (R\$/mês)</b>
Mão-de-obra	1.061.828,00
Custos administrativos	106.182,80
Rejeitos p/ aterro (transporte e disposição)	985.000,00
Energia elétrica	82.014,00
Tratamento lixiviado	34.920,00
Manutenção estrutura	28.400,63
Manutenção equipamentos	183.867,63
<b>Total</b>	<b>2.482.213,06</b>

A Tabela 4.8 apresenta os custos de operação estimados para o Projeto Florianópolis. Destaca-se que os custos de operação estão superestimados. Isto decorre do fato do Projeto Ecoparque ter sido dimensionado para receber todos os RSU do município de Porto Alegre, implicando em custos superestimados quando comparados a um projeto somente de digestão anaeróbia, com consequente redução de custos com mão-de-obra, disposição em aterro e manutenção de equipamentos. Mesmo com estas limitações, optou-se por este método de estimativa de custos de operação pelo fato de ser conservador e por levar em consideração a legislação trabalhista brasileira.

**Tabela 4. 8 - Estimativa de custos de operação do Projeto Florianópolis a partir dos custos do Projeto Ecoparque**

<b>Projeto</b>	<b>Capacidade (t/a)</b>	<b>Proporção</b>	<b>Custos de operação (R\$/ano)</b>
Ecoparque	420.000	100,0%	29.786.556,71
Florianópolis	186.000	44,3%	13.191.189,40

Os métodos de estimativa de custos aqui descritos apresentam limitações, pois, atendendo aos objetivos do estudo, eles visam unicamente estabelecer a ordem de grandeza dos investimentos necessários para a adoção da tecnologia de digestão anaeróbia no município de Florianópolis.

#### 4.4.3. Receitas de operação

Conforme especificado no Capítulo 2, projetos de digestão anaeróbia costumam gerar receitas provenientes do aproveitamento econômico dos subprodutos gerados. Neste estudo, consideraram-se como subprodutos passíveis de aproveitamento econômico o composto resultante da fração sólida do processo de digestão e o aproveitamento energético do biogás.

A receita proveniente da comercialização do composto para utilização como fertilizante agrícola tomou como base o preço praticado pela companhia DMLU (Porto Alegre – RS), que comercializa os subprodutos gerados pela compostagem de resíduos domésticos a R\$30,00 por tonelada de composto.

A geração de energia elétrica pela queima do biogás foi a forma de aproveitamento energético considerada para o Projeto Florianópolis. Admitiu-se que a energia gerada seria comercializada como energia de fonte de biomassa dentro do programa PROINFA, do Governo Federal. Segundo Reichert et al. (2004), o preço praticado por energia de biomassa no programa PROINFA é de R\$ 169,08 por MWh gerado. A Tabela 4.9 apresenta o detalhamento da estimativa das receitas anuais do Projeto Florianópolis.

**Tabela 4. 9 – Receitas operacionais do projeto Florianópolis**

Item	Quantidade (t/a)	Custo unitario (R\$/t)	Receita total (R\$/ano)
Composto estabilizado (preço DMLU)	3.088	30,00	92.652,35
Item	Quantidade (MWh/a)	Custo unitario (R\$/MWh)	Receita total (R\$/ano)
Energia elétrica (biogás) excl. 20% de consumo da planta (PROINFA)	15.910	169,08	2.690.052,68

#### 4.5. COMPARAÇÃO DE CUSTOS ENTRE DIGESTORES ANAERÓBIOS E ATERROS SANITÁRIOS EM FLORIANÓPOLIS

A partir do conhecimento dos custos e receitas do Projeto, é possível estabelecer o preço mínimo a ser cobrado pelo tratamento dos resíduos orgânicos, de forma que o Projeto seja economicamente sustentável. A Tabela 4.10 resume estes resultados.

Verifica-se que, para que o tratamento dos resíduos orgânicos tenha sustentabilidade financeira, deve-se cobrar uma taxa mínima de R\$121,03 por tonelada de resíduo tratado. Este valor pode ser comparado com o valor atualmente praticado pelo município de Florianópolis para dispor seus resíduos no aterro sanitário de Biguaçu, equivalente a R\$107,79 por tonelada (valor vigente em outubro de 2010, segundo informado pela Secretaria de Habitação e Saneamento Ambiental de Florianópolis).

**Tabela 4. 10 – Cálculo da taxa mínima a ser cobrada pelo tratamento de resíduos do projeto Florianópolis**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Custos de operação (R\$/ano)	-13.191.189,40
Venda de energia elétrica à rede (R\$/ano)	2.690.052,68
Venda de composto orgânico (R\$/ano)	92.652,35
<b>Total</b>	<b>-10.408.484,37</b>
Resíduos orgânicos tratados (t/ano)	86.000
Preço mínimo de tratamento (R\$/t)	<b>121,03</b>

Em uma primeira análise, verifica-se que os custos da digestão anaeróbia superam em torno de 13% os custos da disposição em aterros sanitários, podendo tornar a opção inviável economicamente se for analisada somente deste ponto de vista contábil. Entretanto, discute-se haver, no mínimo, duas razões para concluir que a utilização de digestores anaeróbios pode apresentar um preço competitivo ao aterramento sanitário, senão atualmente, em um futuro muito próximo.

A primeira razão consiste no fato de a maior parte dos equipamentos e tecnologias para a implantação de projetos de digestores anaeróbios de resíduos serem importados. Isto ocorre porque esta tecnologia ainda não é amplamente difundida no Brasil. Pode-se prever, no entanto, um aumento no número de projetos e o consequente desenvolvimento de uma indústria nacional voltada à digestão anaeróbia de resíduos. Isto porque a Política Nacional de Resíduos Sólidos do País, aprovada no ano de 2010, estabelece que os resíduos sólidos orgânicos devem sofrer processo de compostagem com posterior utilização do seu composto (evitando sua disposição final), além de prever o aproveitamento energético de resíduos, quando comprovada sua viabilidade técnica e ambiental (BRASIL, 2010). Soma-se a isso o crescente incentivo à geração de energias renováveis, condizente com o

papel de liderança que o Brasil tem exercido quanto ao combate às mudanças climáticas, notadamente com a sanção da Política Nacional sobre Mudança do Clima (BRASIL, 2009).

A segunda razão consiste na tendência de aumento dos custos da disposição de resíduos em aterros sanitários, motivada principalmente pela dificuldade em encontrar terrenos propícios para esta atividade e pelas crescentes exigências técnicas impostas pelos órgãos ambientais para minimizar os impactos desta atividade (WEINER; MATTHEWS, 2003). Em Florianópolis, este argumento se torna ainda mais nítido quando se compara a taxa atual (R\$107,79 por tonelada) à taxa firmada no ano de 2004, equivalente à R\$68,50 por tonelada (SMHSA, 2009), apresentando um aumento de 57% em seis anos.

Por fim, os benefícios ambientais inerentes à digestão anaeróbia de resíduos superam muito os benefícios da disposição em aterros sanitários, tornando esta alternativa um método atrativo de tratamento de resíduos sob os aspectos econômicos e ambientais. Entre os benefícios destacam-se (AL SEADI et al., 2008; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008):

- a) possibilidade de recuperação dos resíduos tratados;
- b) geração de energia elétrica e/ou térmica, permitindo aproveitamento de praticamente 100% do biogás gerado;
- c) redução drástica da quantidade de resíduos encaminhados a aterros sanitários e da carga orgânica dos lixiviados de aterros.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve a intenção de apresentar o estado da arte da utilização de digestores anaeróbios no tratamento de resíduos orgânicos urbanos, realizando uma projeção das possibilidades de utilização deste tipo de opção no município de Florianópolis, SC.

Um dimensionamento simplificado de um sistema de digestão anaeróbia para o tratamento de resíduos orgânicos do município de Florianópolis foi realizado. Para tratar 86.000 t/a (quantidade de resíduos orgânicos estimada para o ano de 2021), um digestor de 7.748 m<sup>3</sup> seria necessário. As estimativas de custo de instalação desta tecnologia apontaram para um investimento da ordem de 15 milhões de reais. Já os custos de operação estimados são da ordem de 13 milhões de reais por ano.

A geração de metano estimada corresponde a 5.000.000 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ano, equivalendo a um potencial de geração de energia elétrica de 2,3 MW. No caso da energia elétrica gerada ser comercializada dentro do programa PROINFA, estimou-se uma receita anual de 2,7 milhões de reais. Já a comercialização do composto estabilizado geraria uma receita anual de 90 mil reais. Os custos de tratamento de resíduos pela nova planta foram estimados em R\$ 121,00 por tonelada de resíduo, valor 12% maior do que a taxa atualmente paga pelo município de Florianópolis para aterrar seus resíduos no aterro sanitário de Biguaçu (R\$107,79 por tonelada).

O dimensionamento simplificado proposto, bem como as estimativas de produção de biogás e de custos associados a esta opção, pretendem servir como primeira reflexão sobre a aplicação desta tecnologia no município de Florianópolis. Os valores estimados apontam para a viabilidade da adoção de digestores anaeróbios em Florianópolis, visando diminuir a quantidade de resíduos destinados ao aterramento sanitário, promovendo a recuperação de resíduos e a geração de energia renovável.

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- a) Avaliar de forma mais abrangente a disponibilidade de resíduos orgânicos de região metropolitana de Florianópolis, incluindo municípios vizinhos e resíduos orgânicos de processos industriais;

- b) Avaliar diferentes métodos e logística de coleta de resíduos orgânicos para estabelecer o mais adequado para a realidade de Florianópolis;
- c) Realizar uma estimativa de custos mais detalhada do projeto de digestão anaeróbia;
- d) Realizar um levantamento mais detalhado de incentivos financeiros e programas de financiamento nos quais projetos de digestão anaeróbia de resíduos possam se enquadrar.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10004 - Resíduos sólidos – Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2004.

AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas handbook**. Biogas for Eastern Europe project, University of Southern Denmark, Esbjerg, 2008. Disponível em: <[http://www.big-east.eu/downloads/IR-reports/ANNEX%202-39\\_WP4\\_D4.1\\_Master-Handbook.pdf](http://www.big-east.eu/downloads/IR-reports/ANNEX%202-39_WP4_D4.1_Master-Handbook.pdf)>. Acesso em: 05/02/2010.

AMIGUN, B.; VON BLOTTNITZ, H. Investigation of scale economies for African biogás installations. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 12, p. 3090-3094, 2007.

AND INTERNATIONAL. **Le marché de la méthanisation en France: hypothèses d'évolution à 5 et 10 ans**. Apresentação de Power Point, Gaz de France e ADEME, 2004.

BIDONE, F. A. (Org.). **Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais: eliminação e valorização**. Rio de Janeiro: Abes, 2001. (PROSAB). Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/prosabbidonefinal.pdf>>. Acesso em: 05/02/2010.

BERGLUND, M.; BÖRJESSON, P. Assessment of energy performance in the life cycle of biogas production. **Biomass & Bioenergy**, v. 30, n. 3, p. 254-266, 2006.

BÖRJESSON, P.; BERLUND, M. Environmental systems analysis of biogas systems- Part I: Fuel-cycle emissions. **Biomass & Bioenergy**, v. 30, n. 5, p. 469-485, 2006.

BÖRJESSON, P.; BERLUND, M. Environmental systems analysis of biogas systems- Part II: The environmental impact of replacing various reference systems. **Biomass & Bioenergy**, v. 31, n. 5, p. 326-344, 2007.

BRASIL. **Lei nº 12.187**, de 29/12/2009 – Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2009/Lei/L12187.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L12187.htm)>. Acesso em: 18/01/11.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02/08/2010 – Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 18/01/11.

CAMPANÁRIO, P. **Florianópolis: dinâmica demográfica e projeção da população por sexo, grupos etários, distritos e bairros (1950-2050)**. Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF), Prefeitura de Florianópolis, 2007.

CASSINI, S. T. (COORD.). **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 2003.

CHARLES, W.; WALKER, L.; CORD-RUWISCH, R. Effect of pre-aeration and inoculums on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 16, p. 2329-2335, 2009.

CGEE. **Manual de capacitação sobre mudança do clima e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, 2008.

COELHO, S. T. **Geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos urbanos e rurais.** Centro Nacional de Referência em Biomassa, Nota Técnica VII, Florianópolis, 2001.

COMCAP. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis.** Companhia de Melhoramentos da Capital, Relatório Final, Florianópolis, 2002.

DE BAERE, L.; MATTHEEUWS, B. Anaerobic digestion of MSW in Europe. **BioCycle**, v. 51, n. 2, p. 24-26, 2010. Disponível em: < <http://www.ows.be/pub/Biocycle.scan.pdf>>. Acesso em: 18/06/2010.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources.** WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.

FEDRIGO, N.S.; GONÇAVES, G.; FIGUEREDO, P.L. **Avaliação do Consumo Energético no Setor Residencial Brasileiro– Florianópolis.** Relatório de iniciação científica (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

GÓMEZ, A.; ZUBIZARRETA, J.; RODRIGUES, M.; DOPAZO, C.; FUEYO, N. Potential and cost electricity generation from human and animal waste in Spain. **Renewable Energy**, v. 35, n. 2, p. 498-505, 2010.

IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2000.** Publicação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2002.

IPT/CEMPRE. **Lixo municipal: Manual de gerenciamento integrado.** Coordenação: Maria Luiza Otero D’Almeida, André Vilhena- 2ª edição, São Paulo, 2000.

JØRGENSEN, P. J. **Biogas- Green energy**. PlanEnergy and Researcher for a Day- Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University, 2a Edição, 2009.

HARTMANN, H.; AHRING, B. K. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: influence of co-digestion with manure. **Water Research**, v. 39, n. 8, p. 1543-1552, 2005.

KAYHANIAN, M.; RICH, D. Pilot-scale high solids thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste with an emphasis on nutrient requirements. **Biomass and Bioenergy**, v. 8, n. 6, p. 433-444, 1995.

KIM, J. K.; OH, B. R.; CHUN, Y. N.; KIM, S. W. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 102, n. 4, p. 328-332, 2006.

KOSSMANN, W.; PÖNITZ, U.; HABERMEHL, S.; HOERZ, T.; KRÄMER, P.; KLINGLER, B.; KELLNER, C.; WITTUR, T.; KLOPOTEK, F. v.; KRIEG, A.; EULER, H. **Biogas digest volume I: Biogas basics**. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Eschborn, 1999a. Disponível em: <<http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-biogas-digest-volume-1-1999.pdf>>. Acesso em: 01/06/2010.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; PRASAD, S. Processo de tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos urbanos e rurais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 48-57, 2002.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S.; SILVA, S. A. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 190-196, 2009.

LEITE, V. D.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S.; LOPES, W. S.; ATHAYDE JR, G. B.; DANTAS, A. M. M. Tratamento de resíduos sólidos de centrais de abastecimento e feiras livres em reator anaeróbio de batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 318-322, 2003.

MCT. **Atividades de Projetos MDL Aprovados nos Termos da Resolução Nº1**. Site da Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC). Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/57967.html>>. Acesso em: 18/01/2011.

MORIN, P.; MARCOS, B.; MORESOLI, C.; LAFLAMME, C. B. Economic and environmental assessment on the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canada. **Applied Energy**, v. 87, n. 1, p. 275-283, 2010.

PINTO, R. O. **Avaliação da digestão anaeróbia na bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos, lodos de tanques sépticos, dejetos suínos e lixiviado**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

RAVEN, R. P. J. M.; GREGERSEN, K. H. Biogas plants in Denmark: successes and setbacks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 1, p. 116-132, 2007.

REICHERT, G.A. et al. (COORD.). **Estudo de viabilidade e sustentabilidade Projeto Ecoparque: relatório final**. Porto Alegre: Convênio DMLU, CGTEE e ELETROBRÁS, 2004.

REICHERT, G.A.; SILVEIRA, D. A. Estudo de viabilidade da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos com geração de energia. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais...** Campo Grande, 2005.

SANNAA, M. N. **The development of biogas technology in Denmark: achievements & obstacles**. Department of Environment, Technology and Social Studies, Roskilde University RUC, Dinamarca, 2004.

SHARMA, V. K.; TESTA, C.; LASTELLA, G. CORNACCHIA, G.; COMPARATO, M. P. Inclined-plug-flow type reactor for anaerobic digestion of semi-solid waste. **Applied Energy**, v. 65, n. 1-4, p. 173-185, 2000.

SMHSA. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico – Produto 7: Diagnóstico do setor de resíduos sólidos**. Prefeitura Municipal de Florianópolis, Secretaria de Habitação e Saneamento Ambiental. Florianópolis, 2009. Disponível em: <[http://portal.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/19\\_07\\_2010\\_18.20.18.20e5a287c0cef6669f612d8d622c0397.pdf](http://portal.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/19_07_2010_18.20.18.20e5a287c0cef6669f612d8d622c0397.pdf)>. Acesso em: 18/01/11.

VANDEVIVERE, P.; DE BAERE, L.; VERSTRAETE, W. Types of anaerobic degesters for solid waste. *In* MATA-ALVAREZ, J. (Editor). **Biomethanization of organic fraction of municipal solid waste**. IWA Publishing, 2003.

WEINER, R. F.; MATTHEWS, R. A. **Environmental engineering**. Elsevier Science, 4a edição, 2003.

WIESMANN, U.; CHOI, I. S.; DOMBROWSKI, E.-M. **Fundamentals of biological wastewater treatment**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007.

ZUPANČIČ, G. D.; URANJEK-ŽEVART, N.; ROŠ, M. Full-scale anaerobic co-digestion of organic waste and municipal sludge. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 2, p. 162-167, 2008.